



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN DEL GASTO MÁXIMO DE DISEÑO PARA OBRAS HIDRÁULICAS
MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JASSEF GERARDO SIMENTAL NÁJERA

TUTOR PRINCIPAL
DR. FELIPE IGNACIO ARREGUÍN CORTÉS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Héctor Alonso Ballinas González

Secretario: Dr. Carlos Eduardo Mariano Romero

Vocal: Dr. Felipe Ignacio Arreguín Cortés

1^{er.} Suplente: M.I. Claudia Elizabeth Cervantes Jaimes

2^{d o.} Suplente: Dr. Michelle Farfán Gutiérrez

Lugar donde se realizó la tesis:

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
JIUTEPEC, MORELOS**

TUTOR DE TESIS:

DR. FELIPE I. ARREGUÍN CORTÉS

FIRMA

*A Karina, mis padres
y mi hermana*

Agradecimientos

A mi novia Karina Ramírez, a su lado aprendo a volar y a creer que puedo lograrlo. Apoyándonos el éxito siempre nos aguardará mi compañera de vida.

A mis Padres, mis grandes pilares de vida, su apoyo me hace sentir que nada es imposible con el esfuerzo adecuado.

A mi hermana Jocelyn, Dios nos trajo a este ángel para colmarlo de dicha y amor, eres la razón por la que soy quien soy.

Al Dr. Felipe I. Arreguín Cortés, tutor de este trabajo, por su visión del mundo presente y futuro; y su determinación para afrontar los retos que nos aguardan.

A la M.I. Claudia Elizabeth Cervantes Jaimes, cotutora extraoficial en la elaboración de esta tesis, su paciencia y apoyo incondicional me llevaron por los caminos correctos.

A la Dr. Michelle Farfán Gutiérrez, sin conocerme me apoyó y me brindo un poco de sus conocimientos, razón por la cual desarrollé el modelo de predicción de uso de suelo.

Parte del comité revisor al Dr. Carlos Mariano Romero y al Dr. Héctor Alonso Ballinas González, gracias por su revisión y sus comentarios.

A mis compañeros de vida por dos años en Morelos, Benigno Durán y Germán Cavazos esta etapa hubiera sido más difícil sin su apoyo y amistad.

A Eduardo Samaniego y Rabindranath Bahena ejemplos de que la ingeniería debe ser dirigida en pro de la humanidad.

A mis compañeros de maestría, Irving Escárcega por su amistad y Cándido Ramírez por su compañerismo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por aceptarme como su alumno y ahora como representante de lo que se puede lograr en sus instituciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca 578797 otorgada, para obtener el grado de maestro en ingeniería.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es tener un precedente del uso de tecnologías disruptivas de la cuarta revolución industrial en la ingeniería hidráulica.

Se propone estimar el gasto máximo de diseño en obras hidráulicas por medio de una técnica de inteligencia artificial llamada autómatas celulares. El caso de estudio es la cuenca que desemboca en la presa El Rejón, la cual está conurbada a la ciudad de Chihuahua, Chih., México.

La estimación de la escorrentía que llega al punto de salida de una cuenca suele ser calculada con los datos históricos de precipitación y las características principales de una cuenca, se tiende a suponer que la permeabilidad del suelo será la misma a lo largo de la vida útil de la obra, lo que no siempre es así.

Por medio de un modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal que utiliza cadenas de Márkov para establecer los porcentajes de transición entre las clases de uso de suelo de mapas, se entrenaron a los autómatas celulares para determinar la tendencia de cambio y generar un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal al año 2053.

Por otro lado, se propone el uso del modelo de cambio climático HADGEM2_ES, por medio de índices que determinan el efecto que éste tendrá en la precipitación a un futuro medio (2045-2069).

Los resultados de la estimación del gasto máximo de diseño para la presa El Rejón indican que si el uso de suelo y la vegetación se presenta como en el mapa de predicción en el año 2053 el gasto se incrementará en un 9.48%, y si se considera el escenario de cambio climático propuesto en la zona de estudio, la escorrentía máxima calculada podría incrementarse 41.52% más con respecto a los 800 m³/s del diseño actual de la presa.

Se concluye que en la estimación del gasto máximo de diseño para obras hidráulicas se debe tomar en cuenta que las características físicas de la cuenca cambian con el tiempo y que el cambio climático genera lluvias con mayor intensidad lo que se traduce en mayor escurrimiento. Estos factores deben ser considerados en la construcción y rehabilitación de obras hidráulicas, sobre todo si ponen en riesgo vidas humanas.

Abstract

The main objective of this work is to set a precedent of the use of disruptive technologies of the fourth industrial revolution in hydraulic engineering.

It is proposed to estimate the maximum design discharge in hydraulic infrastructure by means of an artificial intelligence technique called cellular automata. The case of study is the basin that disembogues into the Rejón dam, conurbated to the city of Chihuahua, Chih., Mexico.

The estimation of the runoff that arrives at the basin point of exit of a basin is usually calculated with the historical data of precipitation and the main characteristics of a basin, thinking that the permeability of the soil will be the same throughout the useful life of the infrastructure, a matter that is not always like that.

With a model of prediction of land use and land cover that uses Márkov chains to establish the percentages of the transition between maps, the cellular automatas were trained to determine the trend of change and to generate a map of land use and land cover to the year 2053.

On the other hand, the use of the HADGEM2_ES climate change model is proposed, through indexes that determine the effect it will have on a medium term future (2045-2069).

The results of the estimation of the maximum design discharge for The Rejón dam indicate that if the land use and land cover tends to behave as in the prediction map to the year 2053, the discharge will increase by 9.48%, and if the effect it might have in the climate change in the study area is considered, calculated maximum runoff could increase 41.52% more than the 800 m³/s of the current design of the dam.

Is concluded that in the estimation of the maximum design discharge for hydraulic works, it should be taken into account that the physical characteristics of the basin change over time and that climate change generates more intense rainfall, which translates into greater runoff. These factors must be considered in the construction and rehabilitation of hydraulic works, especially if they put human lives at risk.

Índice

Capítulo I: Antecedentes generales	1
1.1. La cuarta revolución industrial	1
1.2. Tecnologías disruptivas	2
1.1.2. Big data	2
1.2.2. Cloud computing	4
1.2.3. Robótica	5
1.2.4. Impresión 3D (I3D)	6
1.2.5. Internet de las cosas	6
1.2.6. Ludificación	6
1.2.7. Computación ubicua	7
1.2.8. Drones	7
1.3. Aplicaciones de las tecnologías disruptivas en la hidráulica	8
1.3.1. SIG que infiere información faltante de tubería en Inglaterra	8
1.3.2. Ciber infraestructura como sistema de alerta contra la contaminación de recursos hídricos.	9
1.3.3. Modelo de análisis de recursos hídricos por medio de big data	10
1.3.4. Uso de conjunto de datos de Twitter ante desastres naturales	12
1.3.5. Evaluación del riesgo de inundación para Kota Tinggi Johor en Malasia	13
1.3.6. Herramienta para la evaluación de la resiliencia en los sectores agrícola y forestal mediante tecnologías big data	14
1.4. Inteligencia artificial	15
1.4.1. Tipos de algoritmos de inteligencia artificial en el análisis de datos	17
1.4.2. Bases del funcionamiento de los modelos predictivos de cambio de uso de suelo	18
1.4.3. Autómatas celulares	21
1.4.4. Cadena de Márkov	21
1.5. Cambio climático	22
1.5.1. Escenarios de cambio climático	22
1.5.2. Escenarios regionales de cambio climático	23
1.5.3. Escenarios de cambio climático en la precipitación en México	24
1.5.4. Efecto del cambio climático en el escurrimiento	24

1.5.5. Modelos de predicción de cambio climático en el ACDM	25
1.5.6. Forzamientos radiativos	26
1.5.7. Atlas de Cambio Climático Digital de México	27
1.5.8. Aplicación	28
1.5.9. Despliegue cartográfico y de datos	29
1.5.10. Validación de la base WorldClim (1950-2000)	29
1.6. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático	30
1.6.1. Incremento en de eventos extremos de lluvia con el cambio climático	31
1.6.2. Riesgo municipal por época de lluvias y ciclones tropicales en México y proyecciones bajo escenarios de cambio climático.	32
1.6.3. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México	33
1.6.4. Vulnerabilidad de la agricultura de riego mexicana al cambio climático	33
Capítulo II: Estado del arte	35
2.1. Método empírico para calcular el gasto pico en regiones áridas y semiáridas basado en parámetros morfológicos del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos y el número de curva	36
2.2. Modelo Xinanjiang combinado con el número de curva para simular los efectos del uso de suelo en el escurrimiento.	37
2.3. Predicción del cambio de uso de suelo con respecto a la penetración de fauna invasora y análisis de las principales variables que lo ocasionan en el estado de Connecticut, Estados Unidos	38
2.4. Uso de autómatas celulares como técnica de modelación espacial para determinar el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.	39
2.5. Detección y predicción del cambio del uso de suelo y de vegetación en la costa noroeste del desierto de Egipto utilizando Márkov y células autómatas	40
2.6. Monitoreo y predicción de uso de suelo y vegetación usando sensores remotos y técnicas de SIG, un caso de estudio del área montañosa de la jungla de China.	42
Capítulo III: Planteamiento del problema	44
3.1. Planteamiento del problema	44
3.2. Hipótesis	44
3.3. Objetivo general	44

3.4. Objetivos específicos	45
3.5. Justificación	45
3.6. Alcances	46
Capítulo IV: Caso de estudio	47
4.1. Antecedentes de la presa El Rejón	47
4.1.1. Hidrología	48
4.1.2. Obra de desvío	49
4.1.3. Cortina	50
4.1.4. Obra de toma múltiple	51
4.1.5. Obra de excedencia	52
4.1.6. Datos de construcción, inversión y operación.	52
4.2. Antecedentes de la cuenca El Rejón	53
4.2.1. Localización	53
4.2.2. Hidrografía	53
4.2.3. Edafología	54
4.2.4. Uso de suelo y cobertura vegetal	56
4.2.5. Área y perímetro de la cuenca	58
4.2.6. Longitud del cauce principal	59
4.2.7. Pendiente del cauce principal	59
4.2.8. Información pluviométrica	62
4.2.9. Precipitación media en la cuenca	63
Capítulo V: Metodología	64
5.1. Modelo de simulación de cambio de suelo y cobertura vegetal	64
5.1.1. Cálculo de matrices de transición de Márkov	66
5.1.2. Cálculo de rangos para categorizar las variables continuas	68
5.1.3. Cálculo pesos de evidencia	73
5.1.4. Correlación entre mapas	75
5.1.5. Construcción y ejecución del modelo de simulación	77
5.1.6. Validación de la simulación usando una función de decaimiento exponencial	78
5.1.7. Validación de la simulación usando ventanas múltiples con una función constante	81
5.1.8. Simulación formando parches	82

5.1.9. Simulación con parches y expansión	84
5.1.10. Proyección del mapa	86
5.2. Índice de precipitación ante el cambio climático	86
5.2.1. Elección del escenario de cambio climático y modelo de circulación global.	87
5.2.2. Selección del modelo CMIP5 en la zona de estudio	87
5.3. Estimación actualizada del gasto de diseño	88
5.3.1 Datos de precipitación máxima anual	88
5.3.2. Aplicación del IPcc	89
5.3.3. Análisis de homogeneidad e independencia de los datos	92
5.3.4 Análisis de frecuencias	96
5.3.5. Evento de periodo de retorno seleccionado	98
5.3.6. Modelo lluvia escurrimiento	99
5.3.6.1. Número de escurrimiento	100
5.3.6.2. Curvas intensidad duración-periodo de retorno (IDT)	103
5.3.7. Gasto máximo de diseño para obras hidráulicas	107
5.3.7.1. Método CHOW	107
5.3.7.2. Método del hidrograma unitario triangular	109
5.3.7.3. Método racional	111
Capítulo VI: Resultados	113
6.1. Selección del método de estimación del gasto máximo de diseño	113
6.2. Efecto del cálculo del gasto máximo de diseño utilizando el modelo de predicción de autómatas celulares	113
6.3. Efecto del cálculo del gasto máximo de diseño utilizando IPcc	114
6.4. Efecto del cálculo del gasto máximo de diseño utilizando el modelo de predicción y el IPcc	114
6.5. Comparación con el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México	115
Capitulo VII: Conclusiones	117
7.1. Zona de estudio e infraestructura existente	117
7.3. Variables político-sociales	118
7.4. Recomendaciones	119
7.4.1. En la zona de estudio y la infraestructura existente	119

7.4.2. En la aplicación de autómatas celulares como inteligencia artificial para la predicción de uso de suelo	119
Bibliografía y fuentes de referencia	121
Anexos	125
Anexo I: Mapas resultantes del modelo de circulación global HADGEM2_ES RCP8.5 a futuro medio 2045-2069 en el sistema ACDM.	125
Anexo II: Resultado del modelo de circulación global HADGEM2_ES RCP8.5 a futuro medio 2045-2069 en el sistema ACDM por mes para el caso de estudio	131
Anexo III: Cálculo del gasto máximo de diseño por el método de Chow para distintos periodos de retorno en los años 2017 y 2053 con y sin el IPcc.	133
Anexo IV: Resultados del cálculo de los gastos máximos de diseño para los años 2017 y 2053 con y sin el IPcc para distintos periodos de retorno por el método del hidrograma sintético triangular	157
Anexo V: Resultados del cálculo de gasto máximo de diseño por el método racional para distintos periodos de retorno para los años 2017 y 2053 considerando el IPcc y sin él.	161

Índice de ilustraciones

Ilustración 1	Generación de escenarios de recursos hídricos basados en WRDC Fuente: (Ping A., et al., 2015).	11
Ilustración 2	Técnicas de inteligencia artificial. Fuente: Browne W. Técnicas de inteligencia artificial. Universidad de Cranfiel. 2015.	16
Ilustración 3	Diagrama de flujo para arreglar una lámpara que no funciona. Fuente: LampFlowchart, 2008.	17
Ilustración 4	Secuencia de pasos utilizados por DINAMICA EGO. Fuente: Construyendo un modelo de simulación de cambio de uso de suelo y vegetación. DINAMICA EGO, 2013.	20
Ilustración 5	Índice de vulnerabilidad social en México por municipio. Fuente: Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático, Arreguín F., et al., 2015.	30
Ilustración 6	Resultados de la predicción de uso de suelo al año 2018 con respecto al 2006. Fuente: Wang W., Zhang C. 2016.	39
Ilustración 7	Modelo de predicción de autómatas celulares para los periodos 2011 (izquierda) y 2020 (derecha). Fuente: Padilla O., Pérez P., 2015.	40
Ilustración 8	Áreas de cada uso de suelo como porcentaje de la superficie total del paisaje durante los años 1988, 1999, 2011 y 2023 Fuente: Marwa H., 2015.	41
Ilustración 9	Disminución esperada en el escurrimiento respecto al promedio histórico. Fuente: Rivas Acosta et al., 2010.	43
Ilustración 10	Ubicación de la presa El Rejón, Chihuahua, Chin., México. Fuente: Google, 2019.	47
Ilustración 11	Presa El Rejón en el contexto urbano. Fuente: INEGI, 2016.	49
Ilustración 12	Sección máxima de la cortina de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: SSP CONAGUA, 2012.	51
Ilustración 13	Datos vectoriales de la cuenca El Rejón, Chihua, Méx. Fuente: INEGI, 2017	53
Ilustración 14	Hidrografía de la cuenca El Rejón. Fuente INEGI, 2017.	54
Ilustración 15	Edafología de la cuenca El Rejón. Fuente: INEGI, 1994.	55

Ilustración 16	Uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca El Rejón. Fuente: INEGI, 2017.	58
Ilustración 17	Red hidrográfica. Fuente: SIATL INEGI.	59
Ilustración 18	Gráfica de pendiente de la cuenca El Rejón. Fuente: SIATL INEGI.	60
Ilustración 19	Estaciones climatológicas convencionales circundantes a la cuenca de la presa El Rejón. Fuente: Climate Computing Project, CLICOM, 2018.	62
Ilustración 20	Polígonos de Thiessen a partir de las ECC seleccionadas para el análisis de precipitación. Fuente: CLIMOM V 3.2.	63
Ilustración 21	Metodología propuesta para la estimación del gasto máximo de diseño mediante el uso de automatas celulares y anomalías de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.	64
Ilustración 22	Mapas de uso de suelo y vegetación utilizados para construir el modelo de predicción en la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chihuahua, México. Fuente: INEGI 1984, 2003 y 2017.	65
Ilustración 23	Modelo de matrices de transición de un paso y de pasos múltiples. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO.	67
Ilustración 24	Mapa de caminos locales y rurales de la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI 2017.	69
Ilustración 25	Modelo digital de elevación de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con datos del CLICOM.	70
Ilustración 26	Mapa de pendientes presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con información del INEGI, 1996.	70
Ilustración 27	Mapa de distancia euclidiana a la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuentes: Elaboración propia con datos vectoriales del INEGI, 1996.	71
Ilustración 28	Cuadro de determinación de los rangos de los pesos de evidencia de la transición 1-->5 del modelo de predicción de uso de suelo y vegetación de la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.	72
Ilustración 29	Editor de pesos de evidencia del modelo de cambio de uso de suelo y vegetación de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.	74

- Ilustración 30 Datos de entrada para el modelo de cambio de uso de suelo y vegetación de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO. 77
- Ilustración 31 Mapa resultado del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal 2017 para la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO. 78
- Ilustración 32 Método de comparación difusa utilizando un mapa de diferencias y una función de decrecimiento exponencial. El mismo proceso se aplica a la función de disminución constante, en la que todos los pesos de las ventanas se establecen en 1. Fuente tutorial: Construyendo un modelo de simulación de uso de suelo y vegetación. DINAMICA EGO 2013. 79
- Ilustración 33 Continuación de la Ilustración 31. Fuente: tutorial: Construyendo un modelo de simulación de uso de suelo y vegetación. DINAMICA EGO 2013. 80
- Ilustración 34 Resultado del submodelo de validación gráfica usando una función de decaimiento exponencial. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO. 80
- Ilustración 35 Gráfica del resultado de mínima similitud constante del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal del a Cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih. México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO. 81
- Ilustración 36 Porcentaje de transición para la expansión de parches existentes del modelo de cambio de uso de suelo y vegetación de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO. 83
- Ilustración 37 Parámetros usados para generar nuevos parches en el operador. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO. 84
- Ilustración 38 Modelo Final con adecuaciones de creación y expansión de parches de la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih. México. Fuente: Elaboración propia con el Software DINAMICA EGO. 85
- Ilustración 39 Mapa resultado de la modelación de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México, año 2053. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO. 86

Ilustración 40	Mapa de isoyetas de intensidad de lluvia (mm/hr) para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 60 minutos para el estado de Chihuahua, Chih., México. Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT, 2000.	105
Ilustración 41	Curvas IDT para las ECC-IPcc de la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.	106
Ilustración 42	Curvas IDT para las ECC sin afectaciones de cambio climático para la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.	106
Ilustración 43	Índice de vulnerabilidad social en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Atlas de Vulnerabilidad ante el cambio climático, 2015.	115
Ilustración 44	Propuesta de crecimiento surponiente. Fuente: IMPLAN Chihuahua, 2016.	118

Índice de tablas

Tabla 1 Principales características del big data. Fuente: Blog IIC, 2016.	3
Tabla 2 Los mejores servicios para almacenar archivos en la nube. Fuente: Piquer S., 2019.	4
Tabla 3 Clasificación de las aeronaves no tripuladas por su capacidad de vuelo. Fuente AUVSI.	8
Tabla 4 Riesgo y sus mitigaciones en el sistema. Fuente: Cilofan S., et al., 2012	10
Tabla 5 Áreas de inundación en diferentes escenarios. Fuente: Huey T., et al., 2017.	14
Tabla 6 Algoritmos más utilizados para en el análisis de datos. Fuente: SAXSA, 2018.	18
Tabla 7 Parámetros hidrológicos y morfológicos para periodos de retorno de lluvia de 10 y 50 años, después de Hammouri and El-Naqa. Fuente: El-Hames A., 2012.	36
Tabla 8 Cambios en el escurrimiento para diferentes números de curva en las 3 subcuencas (en 10^8 m^3).Fuente: Kairong Lin, et al., 2014.	38
Tabla 9 Estadísticas para las generaciones existentes de los años 1992, 2003 y 2014 y las predicciones a los años 2025 y 2036. Fuente: Liping C., Yujun S., Saeed S., 2018.	42
Tabla 10 Escurrimiento anual en la presa el Rejón, Chihuahua, Chihua., Méx., Fuente: INEGI, 2000	48
Tabla 11 Gasto de diseño de la presa el Rejón, Chihuahua, Chihua., Méx. Fuente: INEGI, 2000	48
Tabla 12 Capacidad de almacenamiento presa El Rejón, Chihuahua, Chihua., Méx. Fuente INEGI, 2000.	48
Tabla 13 Clasificación de las presas de acuerdo a su tamaño. Fuente: ICOLD.	50
Tabla 14 Tipo de suelo en el primer estrato de la cuenca de la presa El Rejón. Fuente INEGI, 1994.	55
Tabla 15 Uso de suelo y vegetación en la cuenca El Rejón. Fuente INEGI, 2017.	56
Tabla 16 Clasificación de las cuencas dependiendo de su tamaño. Fuente: Campos D., 1998.	58
Tabla 17 Método de Taylor y Schwarz por longitud constante para obtener la pendiente del cauce principal. Fuente: Elaboración propia.	61

Tabla 18 Estaciones climatológicas convencionales analizadas para el estudio de la presa El Rejón-.Fuente: CLICOM 2018	62
Tabla 19 Precipitación media anual de la presa El Rejón. Fuente: CLICOM V 3.2.	63
Tabla 20 Áreas de las clases de cobertura y uso de suelo para la modelación con autómatas celulares en la cuenca El Rejón Chihuahua, Chih., México. Fuente: INEGI 1984, 2003 y 2017.	66
Tabla 21 Matriz de transición de un paso para los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1984 y 2003. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO.	67
Tabla 22 Matriz de transición de 19 pasos para los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1984 y 2003. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO	68
Tabla 23 Importancia de los insumos para las transiciones del modelo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.	73
Tabla 24 Significancia de cada insumo para cada transición del modelo de predicción de uso de suelo de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.	74
Tabla 25 Correlación de pesos de evidencia para el modelo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.	76
Tabla 26 Mínima similitud constante del Modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal del a cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih. México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.	82
Tabla 27 Resumen de los índices de precipitación ante el cambio climático generados con el escenario CMIP5 con un modelo de circulación global HADGEM2_ES con forzamiento radiativo RCP8.5 a un horizonte futuro medio 2045-2069 en la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia por medio del sistema del ACDM.	88
Tabla 28 Valores máximos anuales de precipitación para las estaciones climatológicas convencionales que influyen en el caso de estudio. Fuente: CLIMOM, 2019.	89

Tabla 29 Resultado de la aplicación del IPcc a las estaciones climatológicas convencionales de la cuenca presa El Rejón. Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM y UNIATMOS.	91
Tabla 30 Resultado de cumplimiento de homogeneidad para el estudio hidrológico de la cuenca presa El Rejón, en Chihuahua, Chih., México. Fuente: AFA v1.1, 2010.	95
Tabla 31 Resultados de la prueba de independencia por el método Anderson de los datos pluviométricos de las estaciones climatológicas convencionales de la cuenca presa El Rejón, en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en AFA v1.1, 2010.	96
Tabla 32 Error estándar de ajuste aplicado a cada una de las estaciones climatológicas convencionales (IPcc) del caso de estudio por función de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración propia en AFA v1.1, 2010.	97
Tabla 33 Resultado del análisis de frecuencia de los datos de precipitación máxima anual de las estaciones climatológicas convencionales de la zona de estudio con el IPcc aplicado. Fuente Elaboración propia en AFA v1.1, 2010.	98
Tabla 34 Resultado del análisis de frecuencia de los datos de precipitación máxima anual de las estaciones climatológicas convencionales de la zona de estudio sin el IPcc aplicado. Fuente elaboración propia en análisis de frecuencia AFA v1.1, 2010.	98
Tabla 35 Recomendación de periodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas. Fuente: CONAGUA, 1999.	99
Tabla 36 Agrupación de tipo de suelo y su influencia en el escurrimiento para el uso del número de curva. Fuente: Estrada G., 2008.	100
Tabla 37 Selección del número de escurrimiento. Fuente: Estrada G., 2008	101
Tabla 38 Desarrollo del cálculo del número de curva para el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2017 (INEGI Serie VI). Fuente: Elaboración propia.	102
Tabla 39 Desarrollo del cálculo del número de curva para el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2053 con autómatas celulares. Fuente: Elaboración propia.	102
Tabla 40 Cálculo de intensidades ECC-IPcc por el método de Chen para la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.	105

Tabla 41 Cálculo de intensidades ECC sin efectos del cambio climático por el método de Chen para la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.	106
Tabla 42 Gasto máximo de diseño para los mapas de 2017 y 2053 para diferentes periodos de retorno con y sin el IPcc para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 43 Resumen del cálculo del gasto máxima de diseño por el método del HUT. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 44 Resumen del cálculo del gasto máxima de diseño por el método racional. Fuente: Elaboración propia.	112
Tabla 45 Resumen de la estimación del gasto máximo de diseño 2017 para la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.	113
Tabla 46 Comparación del gasto máximo de diseño por el método racional calculado con ayuda del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal. Fuente: Elaboración propia.	114
Tabla 47 Comparación del gasto máximo de diseño por el método racional calculado con índice de precipitación ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.	114
Tabla 48 Comparación del gasto máximo de diseño por el método racional calculado el modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal y con índice de precipitación ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 49 Proyecciones de cambio de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el estado de Chihuahua. Fuente: Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático, 2015.	116
Tabla 50 Comparación del escenario de cambio climático del estudio con el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.	116



Capítulo I: Antecedentes generales

1.1. La cuarta revolución industrial

La palabra revolución indica un cambio abrupto y radical. Las revoluciones industriales se han producido a lo largo de la historia cuando nuevas tecnologías y formas novedosas de percibir el mundo desencadenan un cambio profundo en los sistemas económicos y las estructuras sociales (Schwab K., 2016).

A finales de siglo XVIII y principios del XIX, la primera revolución industrial transformó el mundo como ningún otro fenómeno histórico lo había hecho desde la implementación de los primeros poblados. Se pasó de una economía rural basada en la agricultura y el comercio, a una economía urbana, industrial y mecanizada, que cabalgaba sobre la máquina de vapor.

En la segunda revolución industrial, la electricidad y los combustibles fósiles podrían dar energía a miles de fábricas que crecieron en tecnificación y tamaño, precipitando una división del trabajo sin precedentes.

En la tercera, la industria se informatizó y se automatizó a una velocidad exponencial desde la década de los setenta.

La cuarta revolución industrial pretende multiplicar la productividad de las empresas, contribuir con los bienes y servicios de la sociedad; generar oleadas de más avances en ámbitos que van desde la secuenciación genética hasta la nanotecnología, y de las energías renovables a la computación cuántica (Schwab K., 2016).

Es la fusión de las nuevas tecnologías y su interacción a través de los dominios físicos, digitales y biológicos lo que hace que la cuarta revolución industrial sea fundamentalmente diferente de las anteriores.



1.2. Tecnologías disruptivas

La disrupción, palabra tomada del inglés “disruptive”, representa cualquier situación, elemento, actividad, comportamiento o decisión que produzca una ruptura brusca con la realidad o el entorno estable, y conduzca a un proceso de cambio, sea físico o no.

El término tecnología disruptiva (disruptive technology en inglés) fue acuñado por Clayton M. Christensen y presentado en 1995 con su artículo “Disruptive technologies: catching the wave, como coautor junto con Joseph Bower.

Las tecnologías disruptivas explican los avances de la innovación, son aquellas tecnologías que conducen a la aparición de productos y servicios frente a una estrategia sostenible a fin de competir contra una tecnología dominante, buscando una progresiva consolidación (Bower J., Christensen C., et al., 1995).

Para ser consideradas tecnologías disruptivas deben de ser de bajo costo y accesibles para la innovación a pequeña escala.

A continuación, se enlistan las tecnologías disruptivas que han tenido más impacto desde que se acuñó el término hasta este momento:

1.1.2. Big data

Es una base de datos no convencional la cual tiene como función principal analizar datos que se han vuelto tan grandes que no se pueden procesar, almacenar y analizar mediante métodos convencionales (Sarmiento B., Hernández M., et al., 2014).

A la acción de extraer valor de la información se le llama ciencia de datos, esto combina las habilidades de programación, matemáticas y estadística con el conocimiento específico. Valor que a su vez se convierte en comprensión, en acción o en decisión.

Los datos que se generan no son siempre de utilidad según el significado de big data, por lo que en la Tabla 1 se presenta las características más importantes de estos.



Tabla 1 Principales características del big data. Fuente: Blog IIC, 2016.

Característica	Definición
Volumen de información	El volumen se refiere a la cantidad de datos que son generados cada segundo, minuto y días en nuestro entorno. Es la característica más relacionada con big data, ya que hace referencia a las cantidades masivas de datos que se almacenan con la finalidad de procesar dicha información, transformando los datos en acciones.
Velocidad de los datos	La velocidad se refiere a los datos en movimiento por las constantes interconexiones que se realizan, es decir, a la rapidez con la que son creados, almacenados y procesados en tiempo real. Para los procesos en los que el tiempo resulta fundamental, tales como la detección de fraude en una transacción bancaria o la monitorización de un evento en redes sociales, estos tipos de datos deben estudiarse en tiempo real.
Variedad de los datos	La variedad se refiere a las formas, tipos y fuentes en las que se registran los datos. Estos datos pueden ser datos estructurados y fáciles de gestionar como son las bases de datos y los datos no estructurados, entre los que se incluyen documentos de texto, correos electrónicos, datos de sensores, audios, videos o imágenes que se tienen en los dispositivos móviles, tabletas y ordenadores. Estos últimos datos requieren de una herramienta específica, debido a que el tratamiento de la información es totalmente diferente con respecto a los datos estructurados.
Veracidad de los datos	La incertidumbre de los datos, es decir, al grado de fiabilidad de la información recibida.
Viabilidad	Se trata de la capacidad que se tiene para generar un uso eficaz del gran volumen de datos que manejan. Es necesario filtrar esta información y seleccionar cuidadosamente los atributos y factores que son capaces de predecir los resultados que más interesan.
Visualización de los datos	El modo en el que los datos son presentados. Una vez que los datos son procesados (los datos están en tablas y hojas de cálculo), se necesitan representar visualmente de manera que sean legibles y accesibles, para encontrar patrones y claves ocultas en el tema a investigar.
Valor de los datos	El valor se obtiene de datos que se transforman en información; ésta a su vez se convierte en conocimiento, y este en acción o en decisión. El valor de los datos está en que sean accionables, es decir, que los responsables puedan tomar una decisión (la mejor decisión) con base en estos datos.

Para visualizar y procesar la gran cantidad de información que representa el big data es necesario utilizar herramientas especializadas que soporten las características antes mencionadas, a continuación, se listan las más comunes, sin embargo, no son las únicas.

- Hadoop Apache, es una aplicación que sirve para dividir las tareas en varios nodos (servidores) y aumentar la eficiencia para almacenar gran cantidad de información.
- Cassandra, es un sistema con un conjunto de datos que sirve para obtener escalabilidad lineal y disponibilidad.
- Jupyter y Spark Apache, son entornos de programación que se pueden usar en exploradores de internet por medio del lenguaje Python.
- Numpy Pandas: es una biblioteca que almacena fórmulas de matemáticas.
- Geo Pandas, es otra biblioteca que almacena algoritmos que sirven para el reconocimiento de datos geoespaciales.



1.2.2. Cloud computing

Es una herramienta virtual que brinda la oportunidad de un gran almacenamiento, sin necesidad de tener infraestructura amplia, ajustándose a los requerimientos de cada cliente. Ofrece alta disponibilidad de información en tiempo real, esta información es guardada en servidores que existen de forma física (Díaz M., et al., 2013).

Entre los servicios de computación en la nube destacan los de la Tabla 2.

Tabla 2 Los mejores servicios para almacenar archivos en la nube. Fuente: Piquer S., 2019.

Servicio	Cap. gratuita, en Gb	Cap. de paga, en Gb	Costo, en dólares	Conclusión
Dropbox	2	5000	20/mes	Dropbox supone una base sólida de almacenaje de archivos en la nube. Es fácil de usar y altamente compatible.
Google Drive	15	Hasta 30,000	260/mes	Interfaz intuitiva, se puede editar archivos sin aplicaciones y es compatible con las aplicaciones de Google.
pCloud	10	Hasta 2,000	500	Gran capacidad gratuita, almacenamiento de por vida que la competencia no tiene y te permite cifrar documentos de manera específica.
Microsoft One Drive	5	Hasta 6,000	91.16/año	Completamente compatible con computadoras con sistema operativo Windows.
Amazon Drive	5	Ilimitado	60/ mes/ Tera	Almacenamiento sobre demanda.
Mega	50	Hasta 4,000	15.64/mes	Se focaliza en seguridad de información.
Tresorit	3	2,000	24/mes	La seguridad es tal que los empleados no pueden acceder a la información a menos que existan requerimientos legales.
SpiderOak	2	5,000	30/ mes	La mejor opción en seguridad, por políticas de la empresa nadie puede acceder a la información.

El mayor espacio gratuito lo tiene Google Drive, la mayor capacidad Amazon Drive y la mejor seguridad SpiderOak.

Existe una condición de no vulnerabilidad donde los usuarios pueden transmitir y almacenar información privada, sin el temor de ser víctimas de ataques informáticos llamada ciberseguridad (Bishop M., 2003).

No siempre esta información es de uso público, y es importante considerar que utilizar la nube para guardar estos datos implica que desde cualquier lugar con internet se puede acceder a ella, por lo que es necesario contar con un sistema seguro, para que solo los usuarios autorizados puedan acceder.

En cuanto a ubicación y nivel de seguridad, las empresas de servicios en la nube cuentan con servicios públicos, privados e híbridos.



En el servicio de nube pública se tiene acceso general a servicios y recursos de computación mediante una conexión pública a través de internet.

La nube privada, es donde los servicios y recursos de computación en la nube están en una red privada, con acceso restringido a usuarios de la organización. Los sistemas de seguridad son más altos, debido al tipo de sensibilidad de los datos que se almacenan, siendo necesario mantener la confidencialidad, la privacidad y la integridad de los datos.

En la nube híbrida estos servicios se utilizan cuando existen datos privados que se ofertan en nubes públicas o cuando existe una colaboración de distintos proveedores de servicios en la nube. Estos servicios ofrecen ahorro, seguridad, flexibilidad y escalabilidad.

La visión de la estrategia nacional de ciberseguridad (Gobierno federal, 2017) marca que, en 2030, México será una nación resiliente ante los riesgos y amenazas en el ciberespacio que aprovecha con responsabilidad el potencial de las TIC para el desarrollo sostenible en un entorno confiable para todos.

En conclusión, el cloud computing se utiliza para fortalecer otras tecnologías de generación y análisis de datos.

1.2.3. Robótica

La palabra robot se acuñó por el escritor checo Karel Čapek en 1921 en su obra dramática *Rossum's universal robots*, a partir de la palabra checa *robot* que significa servidumbre o trabajo forzado, después Isaac Asimov utilizó la palabra robótica para definir la ciencia que estudia a los robots .

La robótica combina diversas disciplinas como son: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control. Como lo describe Karel Čapek el uso de robots disminuye la necesidad del ser humano por realizar actividades, desde las más cotidianas como un robot aspirador hasta el diseño y construcción de maquinaria pesada.



1.2.4. Impresión 3D (I3D)

Es la técnica de modelado por deposición fundida FDM, representa una las principales técnicas para el prototipado rápido, tal y como lo muestran diferentes publicaciones (Pearce C., et al., 2010).

La impresión 3D empezó con poliuretano, pero gracias a la fusión laser con polvo en lugares específicos es posible producir piezas metálicas.

La tecnología de I3D tiene un gran potencial para cambiar la economía circulante, alterará las cadenas de valor económico y permitirá la impresión local y a pequeña escala con tecnologías que actualmente ya existen (Iglesias A., 2018).

1.2.5. Internet de las cosas

El término “internet de las cosas” (internet of things) se creó en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) a finales de los años 90. La Comisión Europea definió internet de las cosas como objetos que tienen identidad y personalidad virtual, y que funcionan en espacios inteligentes haciendo uso de interfaces inteligentes para conectar y comunicarse dentro de un contexto social, del usuario y de su entorno (European, 2008).

El internet de las cosas es la vía de comunicación entre las herramientas que generan y procesan datos, se reduce el tiempo de espera e inclusive se pueden programar los efectos reactivos del análisis de la información y mandar la instrucción a lugares correspondientes.

1.2.6. Ludificación

Se refiere a la aplicación de estrategias de juegos en espacios o ámbitos cuya naturaleza no es lúdica (Deterding, et al., 2011).

La principal finalidad de la ludificación es motivar el cambio de comportamientos hacia un objetivo concreto. Esto se logra por medio de técnicas, elementos y dinámicas propias de los juegos y el ocio que generan puntos, trofeos, medallas, niveles, logros, etc., y crean la motivación necesaria.



La ludificación se menciona como una de las nuevas tecnologías para generar educación y se puede encontrar en la comunidad científica bajo el término gameducation (Mohammad C., 2014).

1.2.7. Computación ubicua

Es entendida como la integración de la informática en el entorno de la persona, de forma que los ordenadores no se perciban como objetos diferenciados, apareciendo en cualquier lugar y en cualquier momento. La computadora es un punto de conexión demasiado enredado, su manejo requiere mucha atención exclusiva, quitando la atención al usuario de la tarea que debe hacer (Weiser M., 1991).

El usuario interactúa con la computadora embebida, que existe en distintas formas, incluyendo computadoras portátiles, tabletas y terminales en objetos comunes tales como refrigeradores, televisiones o un juego de anteojos. La tecnología subyacente que soporta la computación ubicua incluye el internet, el middleware, sistemas operativos, código móvil, sensores, microprocesadores, interfaces de usuario, redes, protocolos de comunicación, posicionamiento y ubicación y nuevos materiales.

Actualmente podemos ver el uso de la computación ubicua como pauta de la generación de programas de cómputo y aplicaciones, diseñadas para que la interacción con el usuario sea sencilla, un ejemplo es como se usan los teléfonos celulares para determinar la localización satelital de puntos de interés con exactitud en metros.

1.2.8. Drones

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), UAV (del inglés unmanned aerial vehicle) también llamado dron es capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, propulsado por un motor eléctrico o de combustión y conducido por un piloto en tierra (García J., 2003).

Sus primeros usos fueron bélicos, sin embargo, el avance en esta tecnología llegó al uso civil en distintas aplicaciones en fotografía, video, traslado de equipo y recolección de datos.



Para tener una mayor idea de la capacidad actual de los drones la Asociación Internacional de Sistemas de Vehículos No Tripulados (AUVSI) desarrolló una clasificación que se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3 Clasificación de las aeronaves no tripuladas por su capacidad de vuelo. Fuente AUVSI.

Categoría	Alcance, (km)	Altitud, (m)	Autonomía, (horas)	Carga máxima, (kg)
Micro	<10	250	1	<5
Mini	<10	150 a 300	<2	<30
Alcance cercano	10 a 30	3,000	2 a 4	150
Alcance corto	30 a 70	3,000	3 a 6	200
Alcance medio	30 a 200	5,000	6 a 10	1,250
Altitud baja, penetración profunda	>250	50 a 9,000	0.5 a 1	350
Autonomía media	>500	8,000	10 a 18	1,250
Autonomía alta, altitud baja	>500	3,000	>24	<30
Autonomía alta, altitud media	>2000	14,000	24 a 48	1,500
Autonomía alta, altitud alta	Aprox. 1500	20,000	24 a 48	12,000
Combate	300	10,000	Aprox. 2	10,000
Ofensivo	0 a 500	4,000	3 a 4	250
Señuelo	>2000	5,000	<4	250
Estratosférico	NA	Entre 20,000 y 30,000	>48	NA
Exo-estratosférico	NA	>30,000	NA	NA

La aplicación de los drones en misiones civiles supone utilizar un espacio aéreo, cuyo uso está muy regulado y controlado para los vuelos tripulados. Además, la necesidad en algún tipo de misión de sobrevolar zonas habitadas obliga a dotar a los drones de una serie de medidas de seguridad que hasta la fecha no están definidas (Barrientos A., 2017).

1.3. Aplicaciones de las tecnologías disruptivas en la hidráulica

En este subcapítulo se explican algunas de las aplicaciones que han tenido las tecnologías disruptivas de la cuarta revolución industrial en los avances de hidráulica e hidrología.

1.3.1. SIG que infiere información faltante de tubería en Inglaterra

En el año 2011 el gobierno de Inglaterra transfirió a las empresas locales la red de alcantarillado, por lo que la compañía Northumbria Water asumió la responsabilidad de 13,500 km de tubería de agua residual adicional a la que ya operaba.



Al revisar, la empresa encontró que solo un 5% de la red de alcantarillado estaba registrada en los mapas y planos que se heredaron por parte del gobierno.

La red transferida tenía poca información disponible sobre la composición de los activos como materiales, tamaños y diámetros de la tubería (Madine M., 2011).

Esto dificultaría la operación y planificación de rehabilitaciones de la red de alcantarillado por lo que se estimó que se tendría que trabajar al respecto durante 15 años.

Por tal motivo la empresa licitó y contrató a otra para que por medio de un SIG y tomando datos del área, se modelará la red de alcantarillado en el resto de la zona.

Las reglas que se utilizaron eran las características de la red en los planos como diámetro, longitud, material, edad de la tubería y localización, por lo que se infirieron atributos de ubicación, construcción, dirección del flujo y uso.

Northumbria está en condiciones de ofrecer un mapa de toda la región en dos años por un costo de 1.25 millones de euros (Madine M., 2011).

Este es el primer paso para generar un SIG inteligente que monitoree la red en tiempo real, que obtenga soluciones a problemas de operación y proponga acciones de rehabilitación que no sean reactivas.

1.3.2. Ciber infraestructura como sistema de alerta contra la contaminación de recursos hídricos.

Los problemas relacionados con la gestión del agua suelen tener connotaciones ambientales y antropológicas, para encontrar las soluciones optimas es necesario captar todos los factores relacionados (Cilofan S., et al., 2012).

En este contexto se obtiene y procesa una gran cantidad de información con el fin de encontrar la dinámica del ciclo hidrológico del área de estudio y propiciar la toma de decisiones asertiva que beneficie a la población y al medio ambiente.



Este estudio tiene por objetivo relacionar la gestión integrada del agua y la ciber infraestructura, basado en la adquisición, integración, almacenamiento, procesamiento y visualización de una gran cantidad de información en los recursos hídricos, para determinar el grado de contaminación de los recursos hídricos. A esto se le llama CIWRM por sus siglas en inglés Cyber-Infrastructure Water Resources Management (Cilofan S., et al., 2012).

CIWRM se desarrolló para las cuencas Arges y Dambovita en Rumania, donde se colocaron sensores en ríos y lagos; y por medio de los servidores de nube de ArcGis se proyectan los datos almacenados en un entorno geoespacial. La implementación del servicio de CIWRM provee de gestión de riesgos según la Tabla 4:

Tabla 4 Riesgo y sus mitigaciones en el sistema. Fuente: Cilofan S., et al., 2012

Riesgo	Mitigación
Contaminación accidental	Bajo el monitoreo contante de la calidad del agua, los valores anormales podrían indicar la contaminación accidental y disparar una alerta en el sistema.
Datos inválidos	Los datos usados para monitorear y tomar decisiones deben un grado de certeza, por lo que existen sensores que periódicamente revisan si existe información errónea o hay información perdida.
Monitoreo del mal funcionamiento	La red de sensores podría estar dañada por la intervención humana, por condiciones meteorológicas o las limitaciones del abasto de energía, en este caso las advertencias de contaminación podrían no ser detectadas, entonces el sistema verifica los procesos para prevenir estas situaciones.
Acontecimientos de perturbación externa	El sistema considera fenómenos que podrían afectar la calidad de las decisiones, por ejemplo, las inundaciones del rio podrían modificar el perfil de los ríos e invalidar los parámetros de propagación del modelo.
Decisiones humanas erróneas	Las decisiones humanas pueden ser transmitidas al sistema de verificación, si la decisión del sistema lleva a efectos negativos se proponen escenarios alternativos.

1.3.3. Modelo de análisis de recursos hídricos por medio de big data

Se construyó un modelo de análisis de escenarios en la gestión de recursos hídricos para satisfacer las necesidades de conservación de agua.

La ecuación 1. 1 se aplicó es una colección de información que describe el estatus los recursos hídricos, el área en las que se aplican y un tiempo dado (Ping A., et al., 2015):

$$S(D, t) = \{DxtxO, O \subset D, T \in [t - \Delta t, t] \wedge O(T) \subset O\}$$

1. 1



Donde:

S=La escena del recurso hídrico

D=Área dada, puede ser un área geográfica específica, recursos hídricos o una combinación de ambos.

t= Un momento dado.

O=Los objetos del recurso hídrico para un área dada, y usando una identificación única.

O (T)=El estado físico del recurso hídrico para un momento dado

Δt =Incrementos de tiempo

Para la construcción adecuada del escenario es necesario elegir la zona apropiada y asignar el tiempo para encontrar los objetos que se deben reconocer en esta región, determinar el tamaño de los objetos y sus atributos en función de los metadatos, esto se hace en un sistema llamado Centro de Datos de Recursos Hídricos por sus siglas en inglés WRDC, que procesa grandes volúmenes de información y ayuda a visualizarlos como se muestra en la Ilustración 1.

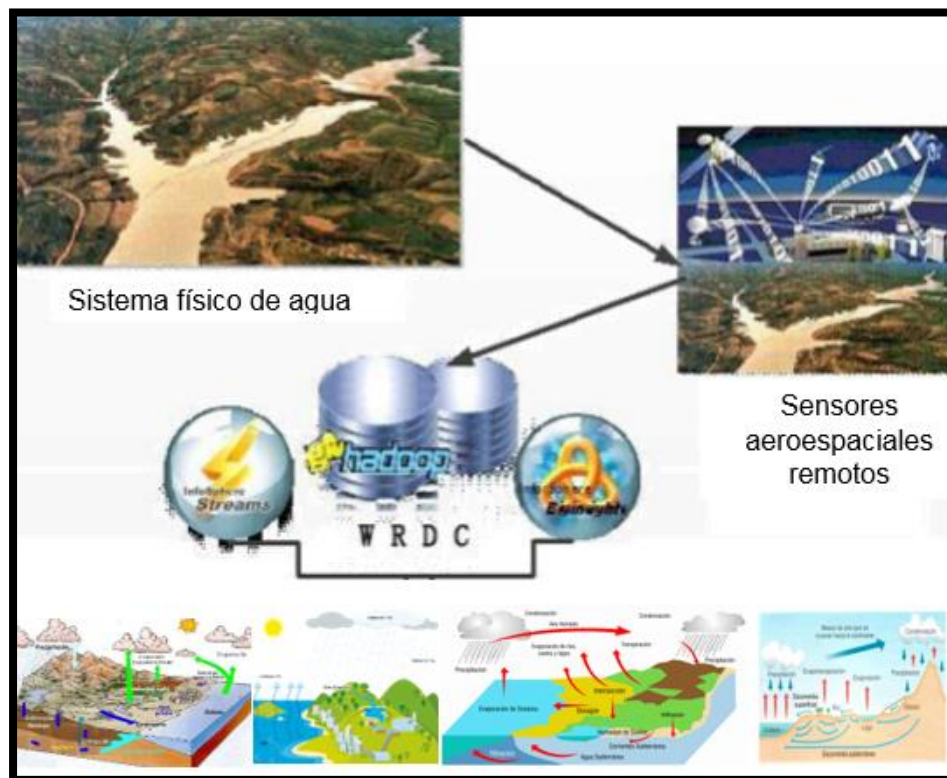


Ilustración 1 Generación de escenarios de recursos hídricos basados en WRDC Fuente: (Ping A., et al., 2015).



El sistema WRDC soporta la entrada de datos tradicionalmente pero también podría generar escenarios obteniendo información de big data, esto debido a que fue desarrollado en un ambiente Hadoop para dividir las tareas de procesamiento en varios nodos.

1.3.4. Uso de conjunto de datos de Twitter ante desastres naturales

Cuando ocurren desastres naturales las plataformas de medios sociales como Twitter y Facebook son consideradas fuentes vitales de información, acerca de los heridos, muertos, infraestructura dañada, la necesidad de apoyo urgente de personas afectadas y vías para encontrar personas perdidas (Houston B., et al., 2015).

La información se comparte principalmente a través de imágenes y texto. Estudios recientes han revelado que las imágenes compartidas en redes sociales durante un desastre natural pueden ayudar a las organizaciones humanitarias (Nguyen D., et al., 2017).

Es por tal motivo que se utilizó Twitter para este estudio, se recopilaron datos durante siete catástrofes naturales del año 2017 que se enlistan a continuación:

- Huracán Irma
- Huracán Harvey
- Huracán María
- Incendio Forestal en California
- Terremoto en Ciudad de México
- Terremoto en Irak
- Inundación en Sri Lanka

Por medio de palabras clave se desarrollaron 3 tareas elementales para agrupar la información:

Tarea 1, determinar si la imagen o texto se recogió durante el desastre, antes o después.

Tarea 2, categoriza la imagen o texto en infraestructura, vehículos, rescate, heridos, muertos, desaparecidos o si la imagen o el texto es irrelevante.

Tarea 3, evalúa la severidad de los daños entre severo y leve.



En este trabajo se analizó un total de 14, 223,141 de Tweets y 576,294 imágenes que se relacionaban con estos desastres, por lo que es un claro ejemplo del uso de big data y del análisis de datos, que, si se aplicaran en el momento del desastre, propiciaría una mejor toma de decisiones y un uso más efectivo de las fuerzas de apoyo.

1.3.5. Evaluación del riesgo de inundación para Kota Tinggi Johor en Malasia

La inundación es el desastre natural más dañino en Malasia en términos de población afectada e impacto socioeconómico (Salaiman C., 2007).

El departamento de riego y drenaje (DID) estimó que el total del área propensa a inundaciones es aproximadamente el 9% de la superficie de Malasia (29,800 km²) y que afecta a más de 4.82 millones de personas (22% de la población total del país). El promedio anual de daños por inundaciones ha sido estimado a 900 millones de dólares (Huey T. et al 2017). El sistema de gestión de inundaciones se basa en medidas de construcción de infraestructura como presas y diques.

Los estudios son realizados con modelos hidrológicos e hidráulicos basados en sensores remotos y teledetección (Kia C., et al., 2012), sin embargo, ninguno de estos estudios se centra en la evaluación del riesgo de inundación en un área determinada debido a que los datos de vulnerabilidad son limitados y es difícil presentarlo en un SIG.

Por lo que el objetivo de este estudio es proporcionar un enfoque simple pero detallado del análisis de riesgo por inundación, evaluar los daños esperados en un subconjunto de clases de uso de suelo para diferentes inundaciones causadas por el río Johor de Kota Tinggi

Para generar los mapas de riesgo por inundación se utilizaron datos geoespaciales de imágenes satelitales y LiDAR.

Las imágenes se tomaron utilizando un satélite Landsat TM 5 y fueron capturadas el 04 de mayo de 2005 usando una técnica de clasificación supervisada con el método de máxima probabilidad, el objetivo de esta técnica de clasificación es obtener el valor del coeficiente de rugosidad de Manning de los usos de suelo.



Los resultados de la modelación se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5 Áreas de inundación en diferentes escenarios. Fuente: Huey T., et al., 2017.

Periodo de retorno, años	Área inundada, km ²	Área no inundada, km ²	Área total de estudio, km ²
2	1.09	10.67	11.76
25	3.78	7.98	11.76
50	4.64	7.12	11.76
100	5.38	6.38	11.76
200	5.61	6.15	11.76

1.3.6. Herramienta para la evaluación de la resiliencia en los sectores agrícola y forestal mediante tecnologías big data

El estrés hídrico constituye un grave problema que se incrementa día tras día debido a la actividad y al desarrollo humano. A esta circunstancia se deben sumar los efectos cada vez más notables del cambio climático, caracterizados por eventos extremos de lluvia y temperaturas (IPCC, 2014).

De esta forma, surge una nueva necesidad de predecir las consecuencias de este escenario para evaluar la resiliencia de los ecosistemas bajo condiciones hidro climáticas variables (Fernández V., et al., 2017).

Para superar esta barrera, se propone una nueva metodología de análisis capaz de manejar de forma eficiente las distintas escalas consideradas y obtener resultados de predicción fiables que permitan incrementar la resiliencia y eficiencia de uso de los recursos hídricos (Scheffer F., 2009).

El módulo de adquisición de datos es el encargado de captar los datos de las diversas fuentes, llevar a cabo el preprocesamiento que sea necesario e incorporar esa información al sistema.

El módulo de procesamiento de datos alberga toda la lógica necesaria para poder transformar la información capturada a través de las diversas fuentes de información (MODIS, SENTINEL, ECMWF, etc.) en valor para el usuario. Las tecnologías empleadas en el diseño de este módulo cumplirán requisitos de escalabilidad, alta tolerancia a fallos y redundancia. Teniendo en cuenta estas características, se utilizarán tecnologías especializadas en el tratamiento masivo de datos (big data) y que puedan garantizar las condiciones de tiempo real que son exigidas.



El emplazamiento definido para la realización de las pruebas del sistema es la península ibérica, de donde se dispone de datos de fuentes libres, existiendo además la posibilidad de realizar pruebas que permitan la validación de estos modelos.

Los resultados que se esperan tras el desarrollo e implementación del sistema construido son fundamentalmente:

Contribución al estado del arte y mejora de la comprensión sobre los procesos implicados en la resiliencia de los sistemas agrícolas y forestales, así como la generación de nuevos indicadores del proceso.

Desarrollo de nuevas técnicas analíticas de minería de datos, herramientas para la gestión eficiente del recurso hídrico y apoyo a la toma de decisiones basadas en la tecnología big data.

Contribución a la creación de planes públicos de actuación en colaboración con gobiernos en la lucha contra el cambio climático y protección de los recursos naturales, así como la concienciación y formación social.

1.4. Inteligencia artificial

Según los expertos Stuart Russell (profesor de ciencias de la computación en la Universidad de California) y Peter Norvig (director de investigación en Google), la inteligencia artificial se clasifica en cuatro tipos de sistemas.

1. Sistemas que piensan como los humanos. John Haugeland (1985): “El nuevo y emocionante esfuerzo por hacer que las computadoras piensen, máquinas con mente, en el sentido completo y literal”. Richard Bellman (1978): “La automatización de las actividades que asociamos con el pensamiento humano, actividades como la toma de decisiones, la resolución de problemas, el aprendizaje y otros”.
2. Sistemas que piensan racionalmente. Eugene Charniak y Drew McDermott (1985): “El estudio de las facultades mentales, a través del uso de modelos computacionales”. Patrick Winston (1992): “El estudio de los cálculos que permiten percibir, razonar y actuar”.



3. Sistemas que actúan como humanos. Raymond Kurzweil (1990): “El arte de crear máquinas que realizan funciones que requieren inteligencia cuando las realizan personas”. Elaine Rich y Kevin Knight (1991): “El estudio de cómo hacer que las computadoras hagan cosas en las que, en este momento, las personas son mejores”.
4. Sistemas que actúan racionalmente. David Poole et al., (1998): “Inteligencia artificial es el estudio del diseño de agentes computacionales inteligentes. Nils Nilsson (1998): “Inteligencia artificial está relacionado con el comportamiento inteligente en dispositivos”.

El primer trabajo reconocido como inteligencia artificial fue desarrollado por Warren McCulloch y Walter Pitts en 1943, ellos propusieron un modelo de neuronas artificiales, donde cada una se caracterizaba por estar encendida o apagada gracias a un estímulo externo.

El énfasis en los algoritmos de programación duró 60 años, donde se elaboraron distintos tipos necesarios para tareas específicas, sin embargo, algunos trabajos recientes sugieren que, para la mayoría de los problemas, los algoritmos ya establecidos funcionan perfectamente, por lo que es necesario preocuparse más por los datos a los cuales se les aplicará inteligencia artificial (Russell S., et al., 2010).

La inteligencia artificial se utiliza en este estudio por medio de la técnica de agentes inteligentes para determinar la relación de un pixel con sus vecinos, dentro del cual se forma un árbol de decisiones, analizando el comportamiento de la naturaleza del pixel en el tiempo y desarrollando una propuesta del comportamiento como se demuestra en la Ilustración 2.

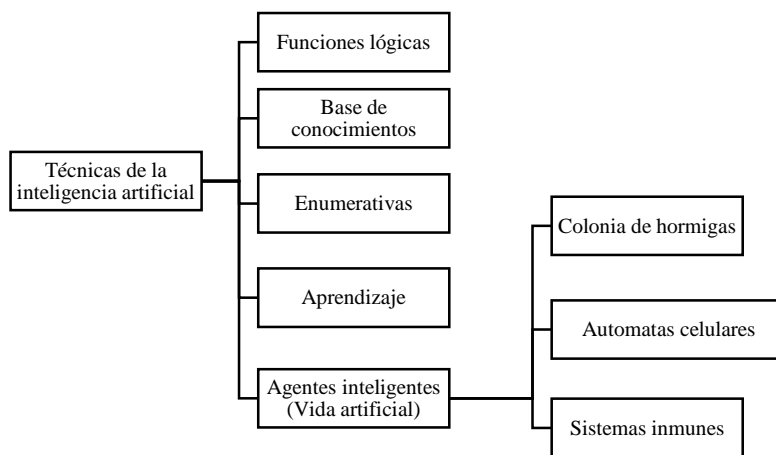


Ilustración 2 Técnicas de inteligencia artificial. Fuente: Browne W. Técnicas de inteligencia artificial. Universidad de Cranfield. 2015.



1.4.1. Tipos de algoritmos de inteligencia artificial en el análisis de datos

Un algoritmo es un conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permiten llevar a cabo una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba hacer dicha actividad, dados un estado inicial y una entrada, siguiendo los pasos sucesivos se llega a un estado final y se obtiene una solución (Gilles B., 1997).

En la Ilustración 3 se muestra el ejemplo de un diagrama que flujo que sirve para representar algoritmos de manera gráfica.

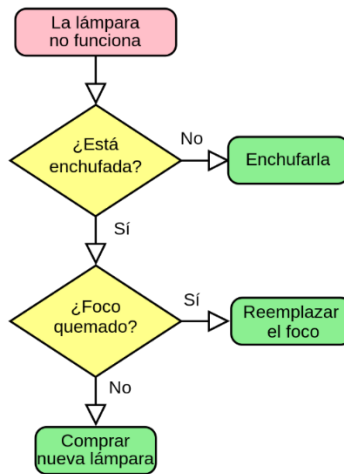


Ilustración 3 Diagrama de flujo para arreglar una lámpara que no funciona. Fuente: LampFlowchart, 2008.

La mayoría de los algoritmos comúnmente utilizados en la ciencia de datos son una secuencia de procedimientos ya establecidos, por lo que regularmente no es necesario crear nuevos y solo se pueden adecuar los datos que se procesarán para obtener resultados aceptables.

A continuación, en la Tabla 6 se describen los algoritmos que se usan en la mayoría de los procesamientos de datos.



Tabla 6 Algoritmos más utilizados para en el análisis de datos. Fuente: SAXSA, 2018.

Algoritmo	Aplicación	Ejemplo
Clasificación o agrupación	Determina si los datos que se analizan pertenecen a un grupo específico.	Estadística de datos.
Dispersión	Desarrollo de tendencias.	Determinación de tendencias en Twitter o el sistema de recomendaciones de Netflix o Amazon.
Regresión lineal	Predecir el valor de un objeto.	Desarrollar la tendencia de un conjunto de datos.
Regresión logística	Es un tipo de análisis de regresión utilizado para predecir el resultado de una variable categórica.	Usar datos demográficos para realizar predicciones sobre los resultados, como el riesgo de contraer una determinada enfermedad.
KNN, vecinos cercanos.	Clasifica cada dato nuevo en el grupo que corresponda, según tenga k vecinos más cerca de un grupo o de otro, calcula la distancia del elemento nuevo a cada uno de los existentes, y ordena dichas distancias de menor a mayor para ir seleccionando el grupo al que pertenecer el dato.	Sistemas de recomendación (plataformas de contenido digital).
Kmeans	Clasificación con base en características solicitadas.	Preprocesamiento para otros algoritmos, para buscar una configuración inicial.
DBS Scan	Clasificación de datos que además contengan ruido (datos inútiles o insignificantes)	Encontrar conjunto de datos que no son linealmente separables.
Algoritmo geoespacial	Encontrar similitudes en los datos a puntos definidos.	Reconocimiento de imágenes para clasificar edificios para Google Earth.
Web Scraping	Análisis de páginas web, donde extrae información de valor.	Simular la navegación de una persona en la red de internet que puede obtener precios de un mismo producto en diferentes tiendas.

1.4.2. Bases del funcionamiento de los modelos predictivos de cambio de uso de suelo

Existen dos aproximaciones en el uso de modelos predictivos de cambio de uso del suelo: (a) modelos basados en regresión y (b) modelos con base en transición espacial (Enríquez H., Azócar B., et al., 2006).

Los primeros establecen relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de uso del suelo, mientras que los modelos basados en transición espacial comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de cadenas de Márkov y autómatas celulares donde se asume explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central.

El desarrollo de modelos espaciotemporales, 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.



El cambio en la cobertura/uso de suelo (CCUS) es uno de los componentes más importantes del cambio global causado principalmente por el rápido crecimiento de la población humana y las altas tasas de consumo de recursos (Sala A., et al., 2000).

No existe un solo enfoque específico que determine o explique los CCUS, elegir un modelo depende de los objetivos de la investigación, llegando a utilizar más de uno si fuese necesario (Verburg D., et al., 2006).

La modelación estadística-espacial del CCUS se deriva de la combinación y el uso de técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariantes.

Por otro lado Lambin (1994) indica tres tipos de modelos para explicar los CCUS: empíricos, algorítmicos y sistémicos.

Los modelos empíricos imitan las relaciones existentes entre las variables que explican el cambio de uso, asumiendo que éstas continuarán de la misma forma en el futuro.

En los modelos algorítmicos, los procesos individuales de un sistema son descritos por ecuaciones simples bajo principios científicos.

Finalmente, los modelos sistémicos están enfocados en explicar el funcionamiento e interacción de todos los componentes de un ecosistema.

Todos los modelos trabajan en base a comparaciones de dos o más mapas de CCUS con fechas diferentes, a través de los cuales se estiman los patrones y procesos de cambio, en base a variables explicativas (Mas B., et al., 2011).

En la actualidad, existen diversos paquetes de modelación con funciones, herramientas, enfoques y metodologías diferentes para propósitos variados. Entre ellas destacan:

- IDRISI
- CLUE-S
- DINAMICA EGO
- LAND CHANGE MODELER (LCM)



DINAMICA EGO, es un software gratuito desarrollado en Brasil, el cual cuenta con amplias ventajas en la identificación de impulsores de cambio, cálculos de tasas de transición, así como en la simulación de escenarios a futuro para monitorear las trayectorias de los cambios por medio de cadenas de Márkov y autómatas celulares. A continuación, en la Ilustración 4 se muestra la secuencia de pasos que se necesitan para generar un modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal.

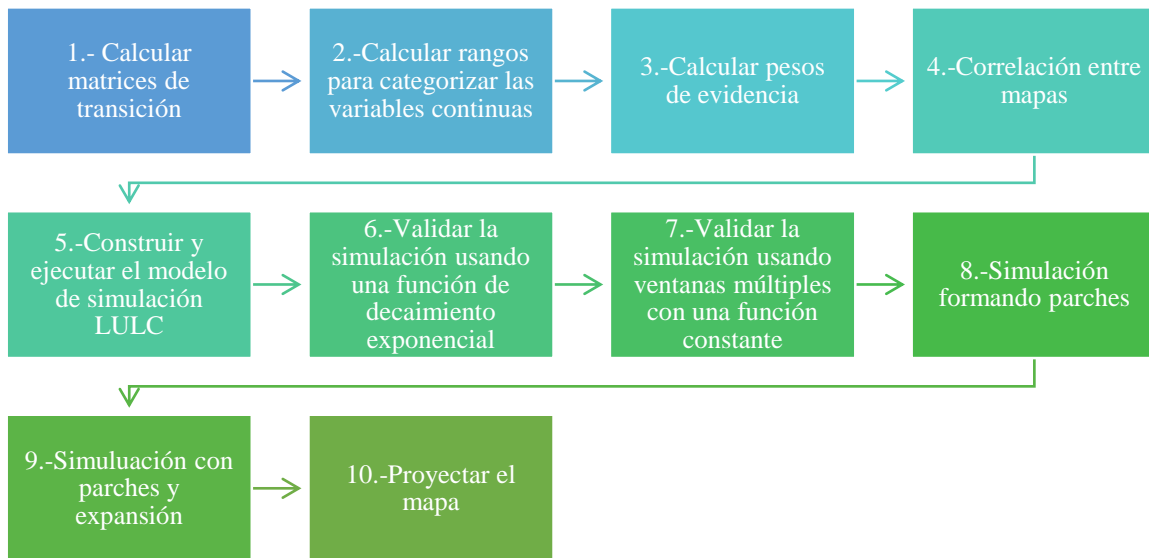


Ilustración 4 Secuencia de pasos utilizados por DINAMICA EGO. Fuente: Construyendo un modelo de simulación de cambio de uso de suelo y vegetación. DINAMICA EGO, 2013.

Los modelos de simulación pueden considerarse como una herramienta útil para evaluar, a corto o largo plazo, los resultados de una variedad de escenarios, traducidos como diferentes marcos socioeconómicos, políticos y ambientales (Britaldo S., 2009).

Entre ellos, una clase especial, los modelos espacialmente explícitos simulan la dinámica de un sistema ambiental, reproduciendo la forma en que evolucionan sus patrones espaciales, para proyectar las probables consecuencias ecológicas y socioeconómicas de la dinámica del sistema (Britaldo S., 2009).



1.4.3. Autómatas celulares

Es un modelo matemático de interacción extremadamente simple; discreto en el espacio y en tiempo, que emula el comportamiento de muchos sistemas naturales (Chau C., et al., 1999)

Puede ser considerado en la práctica como una herramienta computacional parte de la inteligencia artificial basada en modelos biológicos, el cual está básicamente compuesto por una estructura estática de datos y un conjunto finito de reglas que son aplicadas a cada nodo o elemento de la estructura.

Igualmente es un sistema dinámico discreto, el cual evoluciona mediante la interacción de reglas probabilísticas o determinísticas, como cualquier otro sistema dinámico, sus variables cambian como una función de sus propios valores. En general, es una cadena de células evolucionando (Chen C., 2003).

1.4.4. Cadena de Márkov

En la teoría de la probabilidad, se conoce como cadena de Márkov o modelo de Márkov a un tipo especial de proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de que ocurra un evento depende solamente del evento inmediatamente anterior (Basharin B., 2004).

Una cadena de Márkov es una secuencia $X_1, X_2, X_3 \dots$ de variables aleatorias. El dominio de estas variables es llamado espacio; el valor de X_n es el estado del proceso en el tiempo n . 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. 2.

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_2 = x_2, X_1 = x_1) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \quad 1. 2$$

Donde

X_i = el estado del proceso en el instante i .

Se le conoce como propiedad de Márkov cuando ciertos procesos estocásticos "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 A., James R., 1998).



1.5. Cambio climático

El cambio climático es un fenómeno mundial que comprende múltiples interacciones de procesos naturales, sociales, políticos y económicos a escala global y cuyos impactos en los ecosistemas, las economías y las sociedades se verán a mediano y largo plazo (IPCC, 2009).

Las condiciones extremas en el clima afectan la vida del planeta, dependiendo de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia o la temperatura, así como del grado de vulnerabilidad de un ecosistema o de una sociedad, los impactos del clima pueden variar de imperceptibles a catastróficos.

Para valorar el grado de los desastres naturales se debe tener en cuenta el factor riesgo, como una combinación de la amenaza y de la vulnerabilidad. Por lo tanto, las amenazas pueden ser las condiciones ecológicas, sociales y/o económicas extremas asociadas al cambio climático, mientras que la vulnerabilidad está íntimamente asociada al nivel de desarrollo o subdesarrollo de los países (Esguiarte F., et al., 2019).

De acuerdo con el más reciente informe de evaluación del IPCC, el calentamiento del sistema climático es inequívoco, lo que se observa tanto en los incrementos de los promedios globales de las temperaturas del aire y de los océanos, como en el derretimiento de nieve y hielo y en la elevación del nivel medio del mar.

Por lo anterior, resulta necesario analizar las consecuencias que ese calentamiento podría causar en el clima a escalas regionales y locales, así como las repercusiones que podría implicar en todos los aspectos del desarrollo de un país como México.

Existen evidencias claras de que las actividades humanas están cambiando al planeta, produciendo el calentamiento global, y con mayor confianza (90%) de que el calentamiento observado es debido al aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero asociadas a acciones humanas (IPCC, 2015).

1.5.1. Escenarios de 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 las leyes fundamentales de 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 hasta $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) y que permiten su aplicación a escalas regionales (IPCC, 2015).

Los resultados obtenidos por estos GCMs cuando se aplican en condiciones de cambio climático, particularmente para el caso en que la concentración de gases de efecto invernadero se viera duplicada, dan lugar a la construcción de escenarios de cambio climático para diversas variables y proyectados hacia diferentes horizontes (Conde A., 2008).

Las variables sobre las que se presta más atención, por su importancia, son la temperatura de superficie y la precipitación, además los horizontes proyectados se extienden hasta el año 2100 (Conde A., 2008).

1.5.2. Escenarios regionales de cambio climático

Para algunos estudios, la información que proveen estos escenarios puede ser suficiente. En otras ocasiones, es necesario aplicar técnicas de regionalización para poder utilizar la información que proveen los modelos, de tal manera que el clima regional esté caracterizado no sólo por los factores de gran escala que podría aportar, sino también por factores regionales y locales que no son resueltos por estos modelos (Esguiarte F., et al., 2019).

Para la UNIATMOS de la UNAM en conjunto con el Instituto de Ecología y Cambio Climático los métodos empleados para este propósito pueden ser:

- Los modelos de circulación general de alta resolución;
- Los modelos regionales, o modelos anidados de área limitada (RCMs, por sus siglas en inglés);
- Los métodos empírico-estadísticos o estadísticos dinámicos.

Es importante tomar en cuenta que cuanto mayor nivel de reducción de escala (temporal y espacial) se desee, mayor nivel de incertidumbre deberá asumirse debido a que cualquier método que se escoja para reducir la escala necesariamente introducirá incertidumbre adicional al escenario (Esguiarte F., et al., 2019).



1.5.3. Escenarios de cambio climático en la precipitación en México

La señal de cambio climático en la lluvia sobre la región de México y Caribe muestra en promedio entre GCMs un decremento en la precipitación anual acumulada. Sin embargo, la mayoría de las proyecciones de precipitación de los GCM para finales de siglo indican que esta región es una en la que se tiene mayor incertidumbre en sus proyecciones (Meehl B., et al., 2007).

Los cambios más fuertes se observan hacia la región del Pacífico centro y norte, en los estados de Michoacán, Colima, Nayarit y Sinaloa, con anomalías que van de -60 a -100 mm al año en los escenarios, con una dispersión que supera con mucho la magnitud de la anomalía proyectada.

Superponer esta anomalía directamente a un campo de precipitación de alta resolución pasa por alto el hecho de que la precipitación responde a factores orográficos. Por ello, los errores en los patrones de precipitación proyectados deben corregirse en el proceso de regionalización.

Las variaciones cuando se tiene o no un ciclón tropical pueden ser de hasta 50% en la precipitación anual acumulada, mayor que las proyecciones de disminución en la precipitación.

La generación de escenarios regionales de cambio climático es una condición necesaria para tener una mejor estimación del riesgo ante lo que se considera es la mayor amenaza ambiental del presente siglo.

Las técnicas de reducción de escala espacial o temporal permiten pasar a un análisis de potenciales impactos regionales o locales del cambio climático cuando se considera la vulnerabilidad ante condiciones extremas del clima.

1.5.4. Efecto del cambio climático en el escurrimiento

La precipitación es la principal variable en el balance hidrológico. Cualquier cambio en la precipitación tiene implicaciones en su ciclo y en la disponibilidad de los recursos hídricos (Esguiarte F., et al., 2019).



Entonces el escurrimiento depende en gran parte de la precipitación, por lo que un cambio en ésta podría generar un escurrimiento potenciado, por ejemplo, en cuencas donde el cambio de la precipitación es del orden del 5% la escorrentía superficial puede llegar hasta un incremento del 15%.

1.5.5. Modelos de predicción de cambio climático en el ACDM

El sistema del ACDM cuenta con el proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados (CMIP en sus siglas en inglés, Coupled Model Intercomparison Project) que es el marco de comparación diseñado para mejorar el conocimiento del cambio climático, esto facilita la evaluación de las fortalezas y debilidades de los modelos climáticos que pueden mejorar y enfocar el desarrollo de modelos futuros (PCMDI, 2018).

Dentro del sistema del ACDM existen varios modelos de clima:

- CNRMCM5

Es capaz de simular el clima actual y su variabilidad en escalas de tiempo que van desde meses hasta siglos. En particular, este modelo se utiliza para realizar experimentos en el marco del proyecto CMIP5 (Salas M., 2002).

- GFDL_CM3

El modelo de GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) en su versión CM3 se centró en la componente atmosfera, que tiene la intención de permitirnos abordar cuestiones importantes como (Delworth, et al., 2006):

¿Cuáles son los roles de las interacciones aerosol-nube, específicamente los efectos indirectos de los aerosoles?

¿Cuáles son las interacciones dominantes entre química y clima?

¿Cuál es el papel del acoplamiento a la estratosfera (y la química estratosférica)?

- HADGEM2-ES

Es un modelo de sistema terrestre acoplado que fue utilizado por el Met Office Hadley Center para las simulaciones del centenario de CMIP5 (ENES, 2016).



El modelo unificado es utilizado por varias instituciones de todo el mundo tanto para la predicción meteorológica operativa como para la investigación del clima.

HADGEM2-ES fue el primer modelo que incluyó componentes del sistema Earth como estándar. Un número de instituciones de todo el mundo utilizan el modelo unificado tanto para el pronóstico meteorológico operacional como para la investigación del clima. El modelo climático HADGEM-ES comprende un GCM atmosférico con resolución horizontal y vertical N96 y L38, y un GCM oceánico con una resolución horizontal de 1 grado (que aumenta a 1/3 de grado en el ecuador) y 40 niveles verticales (Reichler T., 2008).

- MPI-ESM-LR

Es un modelo integral del sistema terrestre, en el sentido de que consta de modelos de componentes para el océano, la atmosfera y la superficie terrestre (ENES, 2016).

Estos componentes se acoplan a través del intercambio de energía, impulso, agua y gases como el dióxido de carbono.

El acoplamiento de la atmosfera y la tierra, por un lado, y el océano; y la biogeoquímica por otro, es posible gracias al programa de acoplamiento separado (ENES, 2016).

1.5.6. Forzamientos radiativos

El grupo intergubernamental de expertos del IPCC utiliza el término forzamiento radiativo con el sentido específico de una perturbación externa impuesta al balance radiativo del sistema climático de la tierra, que podría conducir a cambios en los parámetros climáticos (Ramaswamy V., 2001).

En el contexto del cambio climático, el término forzamiento se limita a los cambios en el balance radiativo superficie troposfera impuestos por factores externos, sin cambios en la dinámica de la estratosfera, sin tener en cuenta el efecto de retorno proveniente de la superficie o de la troposfera.



Es decir, sin los efectos secundarios inducidos por los cambios de los movimientos o del estado termodinámico de la troposfera, y sin cambios dinámicos en la cantidad y distribución del agua atmosférica (vapor, líquida o sólida) (Ramaswamy V., 2001).

1.5.7. Atlas de Cambio Climático Digital de México

El Atlas Climático Digital de México (ACDM) es el proyecto eje de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) del Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM y su desarrollo ha permitido colaborar y participar con diversos proyectos e investigaciones. El ACDM se fundamenta en la necesidad de disponer de mapas y datos de nuestro país, que contengan información de distintas variables climáticas que son necesarias para una gran diversidad de usuarios, destacando la de modelar la distribución de la biodiversidad, así como para manejar o adecuar el impacto de un posible cambio climático sobre ella (UNIATMOS, 2013).

Existen, además, múltiples estudios relacionados con biodiversidad, ciencias sociales y ciencias de la Tierra en los que los datos climáticos, los parámetros bioclimáticos, la información sobre cambio climático, los aspectos y escenarios socioeconómicos y su cartografía son fundamentales.

El proyecto integra las bases de datos de las superficies climáticas de WorldClim, documentadas con los datos de más de 5,200 estaciones meteorológicas de la base climatológica diaria (1902-2011) del SMN a los que se les aplicó un control de calidad (Hijmans C., et al., 2005).

La cartografía desarrollada sobre modelos y escenarios de cambio climático proviene de la climatología y de los modelos globales de circulación y de escenarios de emisiones del IPCC que fueron procesados e interpolados para México y Centroamérica, a partir del modelo para la evaluación del cambio climático inducido por gases de efecto invernadero (Hijmans C., et al., 2005).



Los escenarios de cambio climático global disponibles tienen una resolución espacial de 2.5° x 2.5° por lo que se interpolaron mediante el método Spline a la resolución de $30''$ x $30''$ en la que se encuentra la climatología (Hijmans C., et al., 2005) disponible en la página: WorldClim, Global Climate Data.

La topografía del territorio es un factor muy importante que no es tomado en cuenta en los modelos y escenarios de cambio climático, pero que si está considerado en la climatología a muy alta resolución ($30''$ x $30''$). Al sumar la anomalía de los modelos del IPCC a la climatología, se incorpora el efecto topográfico y se obtiene una mejor alternativa de distribución espacial de la variable de cambio climático considerada.

Con el propósito de ser consistentes con dichos estudios y bases de datos, la climatología base 1950-2000 fue también la referencia utilizada en los nuevos escenarios de cambio climático para México, generados a partir de la quinta comunicación nacional de México para la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático.

Los nuevos escenarios se estructuraron para 3 forzamientos radiativos: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, mientras que para el modelo HADGEM2-ES se incorporó adicionalmente el forzamiento RCP6.0.

1.5.8. Aplicación

Es una plataforma que permite desplegar y visualizar escenarios de cambio climático y aspectos socioeconómicos a nivel estatal, municipal y regional para México y Centroamérica (UNIATMOS, 2013).

Facilita a los tomadores de decisiones contar con elementos cuantitativos para hacer propuestas que contribuyan a diseñar políticas para reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de adaptación ante el cambio climático en diferentes sectores y regiones.

Constituye un instrumento importante para la investigación con un gran potencial educativo.

Permite conocer y entender la climatología del país y áreas adyacentes en forma atractiva, fácil y amigable a través de internet.

Resulta un medio idóneo para la integración y disponibilidad de datos geoespaciales.



Permite una difusión ilimitada y gratuita de mapas, datos e información mediante internet.

Potencia la interacción y complementación con servicios de mapas en la red (WMS, Web Map Service).

Abre la posibilidad de la interoperabilidad de mapas y bases de datos mediante metadatos.

Permite su utilización para cualquier conjunto de datos geospaciales del país y constituye una plataforma fundamental en materia de ciencia y tecnología de la información.

1.5.9. Despliegue cartográfico y de datos

El ACDM permite desplegar mapas de los valores promedio mensuales de variables climatológicas continentales, de parámetros bioclimáticos derivados, así como de modelos y escenarios de cambio climático a muy alta resolución espacial (926 m).

De igual forma contiene variables ambientales, de climatología oceánica y de aspectos y escenarios socioeconómicos en diversas resoluciones espaciales. La información se despliega en mapas georreferenciados en sistemas interactivos en internet que se pueden exportar en formato KML para ser incorporados en el sistema Google Earth o mediante el servicio Web Map Service (WMS) para ser combinados con información de otras fuentes.

Los datos se pueden descargar en forma gratuita en formatos Geotiff y txt. El sistema cartográfico de referencia utilizado para los despliegues cartográficos es el de coordenadas geográficas sin proyección, Datum WGS 84. El ACDM está en la página uniatmos.atmosfera.unam.mx, portal que contiene cuatro componentes básicas: “servidor de mapas”, “mapas en línea”, “servicio WMS y “bases de datos”.

1.5.10. Validación de la base WorldClim (1950-2000)

En el sistema del ACDM se realizó una comparación mediante diversos parámetros estadísticos de los valores obtenidos de la base de datos climáticos WorldClim contra datos observados en 1900 estaciones meteorológicas del país que cuentan con más de 30 años de registros.



1.6. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático

El concepto vulnerabilidad es social, toda vez que hace referencia a las características, habilidades y capacidades que impide a hombres y mujeres disminuir los riesgos de una amenaza, y transformar sus condiciones de vida hacia la construcción de una mayor capacidad de adaptación y resiliencia frente a los impactos del cambio climático (Arreguín F., et al., 2015).

Los efectos del cambio climático son potencialmente más significativos para la población pobre en los países en vías de desarrollo que para los habitantes de las naciones desarrolladas, debido a su mayor sensibilidad a la exposición a variables climáticas y a su menor capacidad de resiliencia (Soares, et al., 2012).

Conocer la vulnerabilidad social constituye una herramienta útil para conocer los estados en que se ubican las zonas más susceptibles de ser afectadas negativamente por los eventos meteorológicos extremos, en la Ilustración 5 se muestra el mapa de vulnerabilidad social de México por municipio.

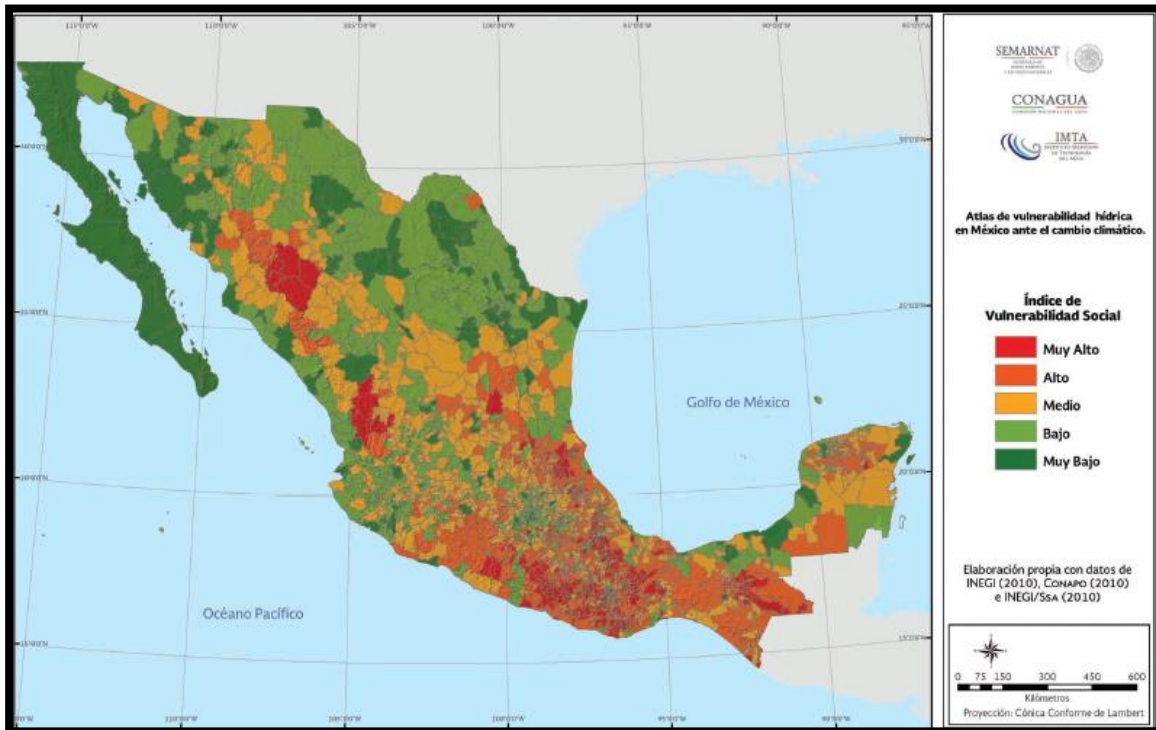


Ilustración 5 Índice de vulnerabilidad social en México por municipio. Fuente: Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático, Arreguín F., et al., 2015.



Es fundamental comprender las causas que llevan a estos eventos meteorológicos extremos, analizando los efectos locales como la influencia de la abrupta orografía mexicana en la dinámica atmosférica, los efectos de los océanos adyacentes a México en el clima regional mexicano.

La ubicación e intensidad de la precipitación asociada a la zona de convergencia intertropical, la intensidad y ubicación de la corriente del pacífico de niveles altos y su relación energética con los frentes fríos, la intensidad y variabilidad estacional de la corriente en chorro de niveles bajos del Caribe y su intercambio energético con las ondas del este, la reproducción adecuada del inicio e intensidad de la precipitación asociada al Monzón de Norteamérica y su relación con la dinámica local como los sistemas convectivos de mesoescala y la orografía (Arreguín F., et al., 2015).

1.6.1. Incremento en de eventos extremos de lluvia con el cambio climático

Desde 1950, aproximadamente, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, también que es probable que existan más regiones en las que haya aumentado el número de sucesos de precipitaciones intensas que en las que haya disminuido, y es probable que la frecuencia o intensidad de las precipitaciones intensas haya aumentado en América del Norte y Europa. En otros continentes existe, como máximo, un nivel de confianza medio en los cambios ocurridos relativos a los sucesos de precipitaciones intensas (IPCC, 2013).

Algunos de los procesos físicos no lineales que intervienen de modo importante en la determinación de la intensidad y distribución de eventos extremos son los siguientes:

- La cantidad de vapor de agua (medida como la presión de saturación del vapor de agua) que una masa de aire en reposo puede mantener, se incrementa con un incremento de temperatura (Goff y Gratch, 1946).



- El vapor de agua que hay en la atmosfera es un gas de efecto invernadero, por lo que existe un mecanismo de retroalimentación positivo (Dessler et al., 2008): a un incremento de temperatura debido al incremento de concentraciones de CO₂, se tiene un incremento de vapor de agua en la atmosfera, que a su vez contribuye a incrementar la temperatura.
- El incremento de temperatura debido al calentamiento global es una manifestación del incremento de energía térmica en la atmosfera. Otras formas de energía dentro del sistema climático son: vientos (energía cinética), derretimiento de nieve y hielo para formar agua líquida (energía de calor latente de fusión), evaporación de agua líquida para incrementar el vapor de agua en la atmosfera (energía de calor latente de evaporación) y la condensación del vapor de agua para formar gotas de agua líquida en las nubes que caen a la superficie en forma de lluvia (calor latente de condensación).

Dentro del sistema climático hay una transferencia continua de la energía térmica a energía cinética y viceversa. Cuando hay un incremento global de temperatura, repercute directa o indirectamente en los sistemas.

1.6.2 Riesgo municipal por época de lluvias y ciclones tropicales en México y proyecciones bajo escenarios de cambio climático.

Se calculó el riesgo para los municipios y delegaciones de la república mexicana, lo cual es un dato importante para la orientación de esfuerzos a corto y mediano plazos (meses a años) para la reducción de pérdidas y daños.

Se observó que los estados que tienen municipios con “muy alto” riesgo son Veracruz, Quintana Roo, Chiapas, Guerrero y Oaxaca, siendo los dos primeros afectados por ciclones del Atlántico; en el caso de Chiapas y Oaxaca, por ciclones de ambos océanos; mientras que para Guerrero por ciclones del océano Pacífico.

Adicionalmente, Yucatán, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Michoacán y Nayarit, son estados que tienen municipios en “alto” riesgo.



En tres de los cuatro estados con el mayor riesgo estatal promedio (Guerrero, Chiapas y Veracruz), las proyecciones de tres de los cuatro modelos climáticos estudiados tienen un incremento de lluvias extremas, lo cual nos indica que los esfuerzos que se realicen en estas entidades para la reducción de la vulnerabilidad podrían ser reconocidos como una labor importante en el corto, mediano y largo plazos.

1.6.3. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México

El agua de los acuíferos podría ser considerada como una reserva estratégica que mejore el grado de adaptabilidad durante una sequía, dado que es de esperarse que durante una carencia extrema de precipitación los embalses presenten bajos niveles de almacenamiento y, por lo tanto, el agua subterránea podría ser la única fuente de suministro.

El reto de la generación actual será revisar que las propuestas de adaptación sean ambientalmente sustentables. Por ejemplo, respetando el gasto ecológico en los ríos y evitando la sobreexplotación de los acuíferos.

En cuestión de abastecimiento, la elevada fragmentación y dispersión de la población rural eleva los costos de transporte, reduce la calidad de los servicios públicos y fomenta la producción de autoconsumo.

Es de esperarse que las comunidades con alto grado de marginación presenten una mayor vulnerabilidad ante una sequía, dado que carecen de los medios ambientales y económicos necesarios para suplementar bajos niveles en el escurrimiento superficial que permitan sustentar sus actividades humanas y productivas.

1.6.4. Vulnerabilidad de la agricultura de riego mexicana al cambio climático

Los sistemas agrícolas son ecosistemas antropogénicos en continua evolución que responden a cambios no sólo climáticos sino también socioeconómicos e institucionales relacionados con el proceso productivo.



Estimar la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático es una tarea difícil debido a la incertidumbre de las proyecciones climáticas, la dificultad para caracterizar la agricultura actual y la incertidumbre en las respuestas adaptativas, planificadas o autónomas que los agricultores e instituciones gubernamentales promuevan e implanten en el futuro.

Se identificaron zonas más susceptibles de afectación por cambio climático y a donde las políticas públicas deben dirigir sus acciones para optimizar los recursos y priorizar las áreas de intervención. Las zonas agrícolas más vulnerables no necesariamente son las zonas con el mayor impacto por exposición al cambio climático, sino las zonas marginadas con baja capacidad de adaptación.



Capítulo II: Estado del arte

En este capítulo se muestran el estado del arte del uso del número de escurrimiento (SCS), algunas aplicaciones que se les han dado a los modelos de predicción de uso de suelo por medio de autómatas celulares y la aplicación del escenario de cambio climático A2 en México.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) antes llamado Servicio de Conservación de Suelos (SCS) es una agencia federal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la cual tiene como misión el mejorar, proteger y conservar los recursos naturales a través de la asociación con agencias estatales y locales, se enfoca principalmente en tierras agrícolas pero contribuye en técnicas de topografía, clasificación de suelos y calidad de agua.

El estudio de la dinámica del suelo contribuye a conocer el manejo que el ser humano le dá a la naturaleza. En años recientes los países han reconocido la importancia de realizarlos para analizar, entender y tomar decisiones en la formulación de políticas de planificación (Flores et al., 2005).

Particularmente, el cambio de uso de suelo genera problemas para la población, dado que provoca una demanda de agua; origina contaminación ambiental, congestionamientos viales, cambios de la temperatura, crecimiento poblacional, conflictos sociales y competencia por el uso de la tierra (Jáuregui, 2004).

Por otro lado, los modelos de predicción de uso de suelo son desarrollados considerando las variables ambientales y antropológicas de la zona de estudio por medio de una técnica de la inteligencia artificial llamada autómatas celulares, apartado 1.4.3.



2.1. Método empírico para calcular el gasto pico en regiones áridas y semiáridas basado en parámetros morfológicos del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos y el número de curva

Un método empírico que utiliza el número de curva (SCS) y las características de una cuenca ha sido desarrollado en Arabia Saudita para ayudar en el cálculo del gasto máximo de diseño en regiones áridas y semiáridas no aforadas con las ecuaciones 1.3.

$$Q_p = \frac{10P_eAY^{0.65}}{L^{0.2}d^{0.2}} \quad P_e = \frac{(P - 2S)^2}{P + 0.8S} \quad S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad d = P - P_e$$

1. 3

Donde:

P_e = Precipitación efectiva, en mm.

A=Área de la cuenca, en km^2

Y=Pendiente media de la cuenca, en m/m.

L=Longitud del cauce principal, en m.

d= Capacidad de almacenamiento de la cuenca considerando evaporación infiltración y abstracciones, en mm.

P=Precipitación total, en mm.

S=Almacenamiento máximo de la cuenca, en mm.

CN= Número de curva

Este método se comporta bien en cuencas mayores de 45 km^2 con un coeficiente de correlación de 0.92 sin embargo para cuencas menores el coeficiente de correlación es de 0.67, considerando este método empírico una alternativa al método racional (El-Hames A., 2012). Los resultados del cálculo del gasto pico por el método empírico se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Parámetros hidrológicos y morfológicos para periodos de retorno de lluvia de 10 y 50 años, después de Hammouri and El-Naqa. Fuente: El-Hames A., 2012.

Tr, años	Long. cauce, m	Pendiente	Área, km^2	Número de curva	Precipitación, mm	Precipitación efectiva, mm	Q_p SCS-CN m^3/s	Q_p Método empírico m^3/s
10	11,700	0.034	18.9	78	42.58	7.99	11.84	12.68
50	11,700	0.034	18.9	78	59.41	17.41	26.50	26.57



2.2. Modelo Xinanjiang combinado con el número de curva para simular los efectos del uso de suelo en el escurrimiento.

El cambio de uso de suelo ha sido identificado como una variable importante en los cambios de escorrentía, por lo que en China se realizó un nuevo modelo llamado XAJ-CN que ha sido integrado al modelo Xinanjiang y al modelo del número de curva del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos, para evaluar los cambios de escurrimiento en la cuenca del río East.

Tres subcuencas, fueron seleccionadas como caso de estudio en la parte media y baja del río East, éstas constituyen el sistema de fuente de agua más importante de la provincia de Guangdong y Hong Kong.

Basándose en las propiedades de uso del suelo el modelo Xaj-CN propuesto fue calibrado y validado usando 10 años de datos. Después se observó que la serie de escorrentía simulada correspondía con el observado, indicando que el modelo Xaj-CN fue satisfactorio.

Entonces se aplicó el modelo propuesto para simular el efecto de los cambios de uso del suelo en las variaciones de escorrentía en seis escenarios específicos.

Al final, se analizó el impacto de la urbanización ambiental usando los métodos IHA (Indicadores de Alteración Hidrológica) e HMA (Hidrograma de Enfoque Coincidente).

Los resultados mostraron que el impacto del cambio en la escorrentía era más evidente en la temporada de lluvias cuando se compara con la temporada de estiaje. El efecto del cambio en el valor del número de curva se muestra en la Tabla 8 y explica que la escorrentía superficial fue mayor en la temporada de lluvias y que el cambio en el número de curva afectó principalmente a la escorrentía de las aguas subterráneas en la temporada de estiaje.



Tabla 8 Cambios en el escurrimiento para diferentes números de curva en las 3 subcuencas (en 10^8 m^3). Fuente: Kairong Lin, et al., 2014.

Cuenca	ΔCN	Anual, m ³ /s			
		Superficial	Sub Superficial	Subterráneo	Gasto Total
Shuntian	-10	-0.286	-0.119	-0.17	-0.575
	-5	-0.159	-0.071	-0.105	-0.335
	-3	-0.097	-0.044	-0.066	-0.207
	3	0.098	0.043	0.066	0.207
	5	0.164	0.073	0.112	0.349
	10	0.345	0.155	0.24	0.74
Yuecheng	-10	-0.16	-0.084	-0.091	-0.335
	-5	-0.08	-0.044	-0.047	-0.171
	-3	-0.048	-0.026	-0.029	-0.103
	3	0.047	0.025	0.027	0.099
	5	0.089	0.042	0.045	0.176
	10	0.157	0.083	0.089	0.329
Lantang	-10	-0.254	-0.172	-0.189	-0.615
	-5	-0.124	-0.076	-0.083	-0.283
	-3	-0.075	-0.045	-0.049	-0.169
	3	0.083	0.047	0.051	0.181
	5	0.143	0.084	0.091	0.318
	10	0.292	0.169	0.182	0.643

2.3. Predicción del cambio de uso de suelo con respecto a la penetración de fauna invasora y análisis de las principales variables que lo ocasionan en el estado de Connecticut, Estados Unidos

Este proyecto tuvo como objetivo proveer de información actualizada, estandarizada y comparable del uso de suelo pasado, presente y futuro.

Se realizó un análisis de los mapas de uso de suelo y vegetación, con una predicción de 5 años del comportamiento en la invasión de especies de flora, por medio del software IDRISI y un modelo Multi-Layer Perceptron Markov, utilizando mapas de 1996, 2001 y 2013.

Los resultados mostrados en la Ilustraci3n 6 sugieren que la conversi3n de los bosques debe ser controlada y administrada para interponerse en la invasi3n de especies invasoras (Wang W., Zhang C. 2016).

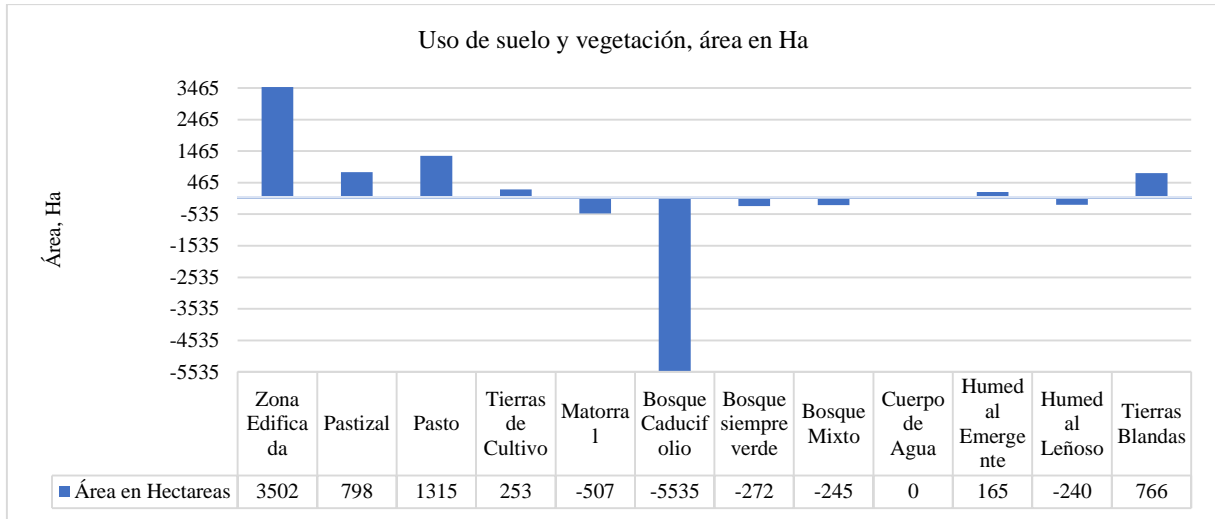


Ilustración 6 Resultados de la predicción de uso de suelo al año 2018 con respecto al 2006. Fuente: Wang W., Zhang C. 2016.

2.4. Uso de autómatas celulares como técnica de modelación espacial para determinar el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.

En 2015, se utilizaron células autómatas para determinar el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en la Amazonia Ecuatoriana, a través de un modelo de sistema dinámico con el software DINAMICA EGO. En la calibración se usaron los mapas de 1965 y 2001 para hacer la predicción al 2011, después se comparó el mapa creado con el real y se determinó su similitud, teniendo una semejanza del 80%; con lo que se aceptó el modelo desarrollado. Después de esto, se realizó una predicción al año 2020, con el objetivo de determinar la erosión y disminución de la cobertura vegetal.

Esta simulación mostrada en la Ilustración 7 indica que al año 2011 el 91.39% del bosque primario ha desaparecido y al año 2020 desaparecerá el 95.49 %, quedando únicamente el 4.51% de la totalidad del área de bosques primarios, con tendencia a desaparecer por completo de continuar con las tendencias. (Padilla O., Pérez P., 2015).

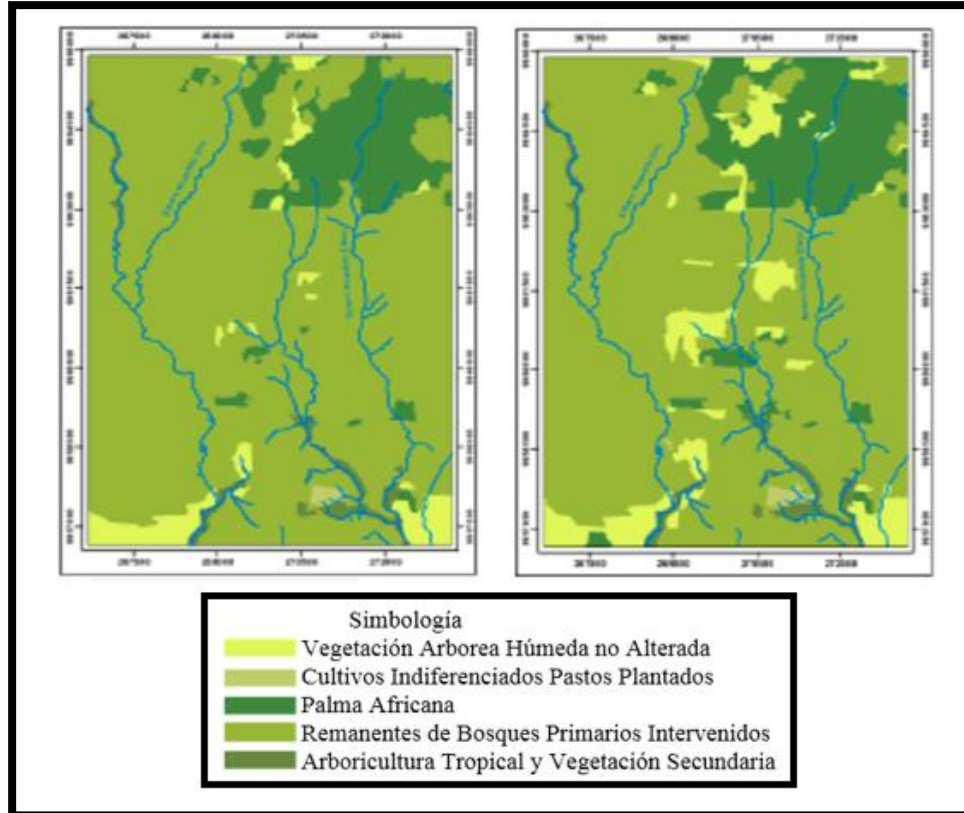


Ilustración 7 Modelo de predicción de autómatas celulares para los periodos 2011 (izquierda) y 2020 (derecha). Fuente: Padilla O., Pérez P., 2015.

2.5. Detección y predicción del cambio del uso de suelo y de vegetación en la costa noroeste del desierto de Egipto utilizando Márkov y células autómatas

En Egipto se realizó la detección de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo para ayudar a la protección de la vida silvestre.

El área de estudio es parte del desierto occidental de Egipto situada al oeste del río Nilo a 60 km al oeste de Alejandría. El área incluye una de las dos reservas de la biosfera existentes en Egipto, Omayed.

Se utilizó el software IDRISI con un modelo de células autómatas y cadenas de Márkov en mapas de 1988 y 1999 para calibrar la predicción al año 2011, obteniendo una similitud de hasta 90% con el real. Por último, se realizó la proyección al año 2023 (Marwa H., 2015).



En la Ilustración 8 se muestra la comparación para cada tipo de suelo, la distribución potencial en el año 2023 muestra la expansión de las tierras de cultivo. También muestra aumentos en canteras y el crecimiento en los centros residenciales en la zona, así como un aumento en el área de complejos en las dunas costeras.

En consecuencia, con la tendencia actual del cambio de uso del suelo debido a las actividades de desarrollo, es probable que exista deterioro de la cubierta vegetal natural. Por lo tanto, la presión sobre estas áreas va a crecer más alrededor de las carreteras y cerca de los asentamientos humanos.

Los resultados ayudarán a tomar mejores decisiones con respecto a las actividades dirigidas hacia la protección de la vida silvestre en el área, también se puede utilizar como una guía para otros estudios que apuntan a proyectar cambios en áreas áridas que experimentan casos similares en el uso de la tierra.

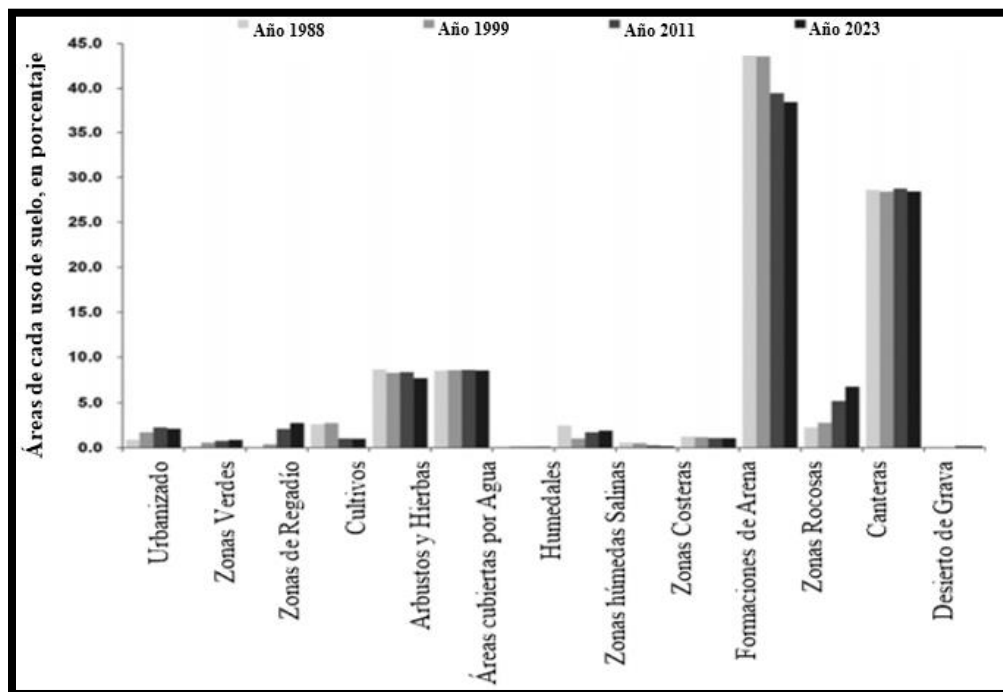


Ilustración 8 Áreas de cada uso de suelo como porcentaje de la superficie total del paisaje durante los años 1988, 1999, 2011 y 2023 Fuente: Marwa H., 2015.



2.6. Monitoreo y predicción de uso de suelo y vegetación usando sensores remotos y técnicas de SIG, un caso de estudio del área montañosa de la jungla de China.

En China, se realizó una predicción del uso de suelo y vegetación, utilizando el Software IDRISI en un modelo de células automátatas y cadenas de Márkov con mapas de 1992, 2003 y 2014, para realizar predicciones al año 2025 y 2036, que fueron utilizados para proporcionar sugerencias y una base para la planificación del desarrollo urbano (Liping C, Yujun S, Saeed S, 2018).

En la Tabla 9 se muestran los porcentajes de área por uso de suelo, para los años 1992, 2003 y 2014. Bajo la influencia de las actividades humanas, los cambios de uso del suelo en la jungla son evidentes, las regiones con agua disminuyeron y luego aumentaron, esto debido a que en el año 1992 fueron construidos equipos de extracción de arena en el río Jinxi y una gran cantidad de sedimento fue depositado en la orilla del río por lo que se fue adelgazando gradualmente; entre el año 2003 y el 2014 varios equipos fueron instalados para reducir el sedimento por lo que las regiones cubiertas por agua fueron restauradas.

Tabla 9 Estadísticas para las generaciones existentes de los años 1992, 2003 y 2014 y las predicciones a los años 2025 y 2036. Fuente: Liping C., Yujun S., Saeed S., 2018.

Uso de suelo	Generaciones			Predicción	
	1992	2003	2014	2025	2036
	Área %				
Agua	0.89	0.61	0.89	1.19	2.16
Urbano	2.39	2.8	3.06	6.79	11.91
Tierra desolada	3.16	4.02	3.63	8.37	15.11
Jungla	89.21	89.56	88.55	75.17	55.65
Tierras de cultivo	4.34	3	3.87	8.48	15.17
Total	100	100	100	100	100

Por otro lado, la jungla es la vegetación que representa la mayor área y ésta va decreciendo con los años, los cambios se relacionan con la extracción de madera y la expansión urbana. Por último, los autores mencionan que existe una posibilidad de impacto al medio ambiente si no se consideran acciones por el bien de la ecología de la región.



2.7. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México

El cambio climático es una de las preocupaciones de la sociedad con respecto al medio ambiente, “el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar” (IPCC, 2007).

En los recursos hídricos los efectos del cambio climático serán extensos, pero diferentes dependiendo de las regiones en las que se analice, en latitudes altas se espera un incremento en la precipitación y el escurrimiento; en lo que podría incrementar la oferta de agua en estas zonas y a la vez el riesgo en las obras hidráulicas ya construidas, debido a que están diseñadas para soportar una esorrentía de diseño con base en un registro histórico que no contempla eventos extremos recientes.

En un clima más cálido es de esperarse eventos de precipitación más intensa, aun en lugares donde la precipitación promedio anual será probablemente menor a la media.

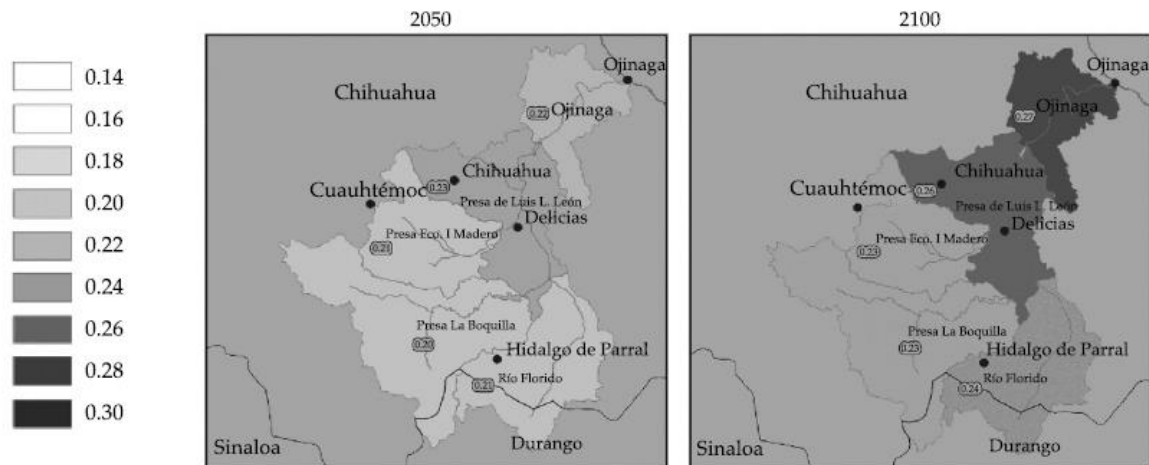


Ilustración 9 Disminución esperada en el escurrimiento respecto al promedio histórico. Fuente: Rivas Acosta et al., 2010.

Como se puede observar en la Ilustración 9 en el estado de Chihuahua se esperan disminuciones en el escurrimiento de alrededor de 21% para 2050 y de 25% para 2100, sin embargo, la intensidad de lluvia será mayor según el escenario A2 (Martínez P., Patiño C. et al., 2012).



Capítulo III: Planteamiento del problema

3.1. Planteamiento del problema

La estimación del escurrimiento superficial, para el diseño de obras hidráulicas, es un proceso complejo, debido a que intervienen diversos factores como son: tipo de suelo, pendiente, uso de suelo y vegetación, área de la cuenca, longitud del cauce principal y precipitación (Aparicio F., 1989).

En este cálculo el uso de suelo y vegetación se analiza con la cartografía más reciente disponible, sin embargo, no se considera el cambio que tendrá en el tiempo, y se supone que la permeabilidad del suelo será la misma a lo largo de la vida útil de la obra y por lo tanto el efecto que tiene en la relación lluvia escurrimiento.

Esta suposición tiene como consecuencia que las obras hidráulicas construidas sean dimensionadas para un funcionamiento establecido diferente, debido a que el flujo aumenta o disminuye con el tiempo en relación con la cobertura vegetal y el uso de suelo aguas arriba de la ubicación de la obra.

3.2. Hipótesis

Con la aplicación de una técnica de la inteligencia artificial llamada autómatas celulares, es posible desarrollar un modelo de predicción de uso de suelo con el que se estime el gasto máximo de diseño de una cuenca a lo largo de la vida de una obra hidráulica.

3.3. Objetivo general

Fundamentar y desarrollar una metodología utilizando autómatas celulares para desarrollar un modelo de predicción de uso de suelo y estimar el gasto máximo de diseño de una obra hidráulica.



3.4. Objetivos específicos

- Identificar las tecnologías disruptivas de la cuarta revolución industrial.
- Investigar casos de aplicación de las tecnologías disruptivas identificadas, en el diseño de las obras hidráulicas.
- Determinar el patrón de cambio y simular un mapa de uso de suelo y vegetación al final del periodo de vida útil de la cuenca de aportación de una obra hidráulica.
- Analizar el impacto que genera el cambio climático en el escurrimiento de la zona de estudio.
- Estimar el gasto máximo de diseño con base en el mapa de simulación obtenido y considerando el cambio climático.

3.5. Justificación

El garantizar el acceso al agua en calidad y cantidad suficiente para salvaguardar la salud, los bienes, los servicios y la preservación de suficiente recurso hídrico para el ecosistema, es una tarea cada vez más difícil, además el cambio climático hace que las obras hidráulicas sean afectadas por lluvias con intensidades que se superan con el tiempo, lo que pone en riesgo a la población.

Por medio de los autómatas celulares, se desarrollará un modelo de predicción de uso de suelo a largo plazo, lo que posibilita obtener la permeabilidad de la zona de estudio en un futuro cercano, para que la infraestructura hidráulica sea dimensionada con mayor certidumbre.

Al tener obras hidráulicas que a lo largo de su vida útil soportan los cambios del medio ambiente, se propicia el uso adecuado del agua y la seguridad contra inundaciones.



3.6. Alcances

Se consideran las tecnologías aplicadas en la hidráulica hasta el término de este documento. Se incluyen solo ejemplos representativos de la aplicación de las tecnologías disruptivas en el diseño de obras hidráulicas.

La metodología desarrollada en el modelo de predicción de uso de suelo y en la estimación del gasto máximo de diseño, es aplicable bajo las condiciones de disponibilidad de información descritas.



Capítulo IV: Caso de estudio

4.1. Antecedentes de la presa El Rejón

La presa El Rejón es una obra construida en 1966, almacena 7.88 Mm³ para regular las avenidas del arroyo con el mismo nombre; y así proteger las obras de rectificación y canalización del río Chuvísar además disminuye la probabilidad de inundaciones en la ciudad de Chihuahua.

La presa está situada en las coordenadas 28° 36' 51" latitud norte y 106°07' 03" longitud oeste de Greenwich, en las cercanías de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México. En la Ilustración 10 se muestra la ubicación de la presa a nivel nacional.



Ilustración 10 Ubicación de la presa El Rejón, Chihuahua, Chin., México. Fuente: Google, 2019.



4.1.1. Hidrología

La región hidrológica en la que se encuentra la presa El Rejón es la N°24, Conchos Chuvíscar.

El escurrimiento anual promedio se registró a partir del periodo de observación 1968 a 1997 como se muestra en la Tabla 10 en millones de metros cúbicos, con el fin de mostrar el volumen de las descargas de agua más importantes de la cuenca.

Tabla 10 Escurrimiento anual en la presa el Rejón, Chihuahua, Chihua., Méx., Fuente: INEGI, 2000

Escurrimiento Anual	Mm ³
Mínimo	0.17
Medio	3.58
Máximo	16.00

Los gastos y el intervalo de tiempo para los cuales se diseñaron los componentes de la presa se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11 Gasto de diseño de la presa el Rejón, Chihuahua, Chihua., Méx. Fuente: INEGI, 2000

Avenida de diseño	800 m ³ /s
Gasto máximo regularizado	80 m ³ /s
Máximo periodo de retorno de diseño	10,000 años

Las capacidades y elevaciones de la presa de El Rejón se desarrollan en la Tabla 12.

Tabla 12 Capacidad de almacenamiento presa El Rejón, Chihuahua, Chihua., Méx. Fuente INEGI, 2000.

Tipo	Almacenamiento, Mm ³	Elevación, msnm
Azolves	0.53	1,462.99
Útil	6.00	1,477.00 NAMO
Súper almacenamiento	1.35	1,478.32 NAME
Total	7.88	
Embalse	Área, Ha	
Al NAMO	42.3	
Al NAME	96.8	

El bordo libre se encuentra a 1.48 m. del NAME.

La ciudad de Chihuahua rodea a la cuenca de la presa El Rejón en el lado oriente como se observa en la Ilustración 11.

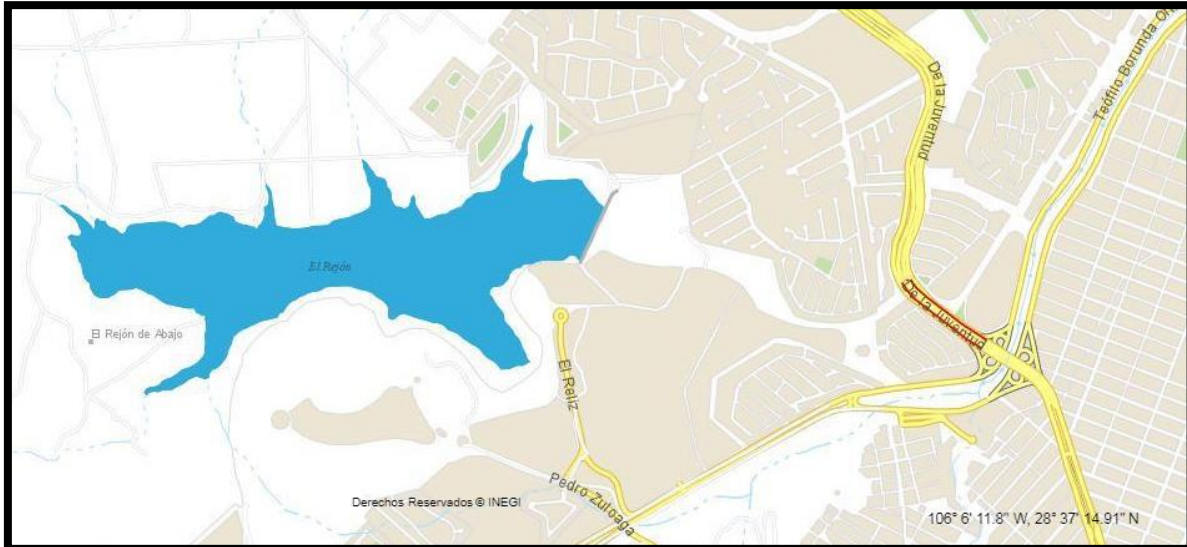


Ilustración 11 Presa El Rejón en el contexto urbano. Fuente: INEGI, 2016.

4.1.2. Obra de desvío

La obra de desvío normalmente tiene carácter temporal, y su objetivo es mantener seco el recinto de construcción de la presa y de sus obras auxiliares, durante el tiempo que éstas lo requieran (Arreguín F., 2000).

Aun cuando la obra se utiliza durante la época en que es necesario desviar el río, la estructura o parte de ella podría usarse en la obra de toma o en la de excedencias, mediante una adecuada planeación, construcción y operación (Marengo., 2001).

La obra de desvío de la presa El Rejón está localizada en la estación 0+236.285. Se instaló un orificio de 1.52m por 1.52m a la elevación de 1,457.00 msnm. que se operó desde la plataforma superior de la estructura con rejillas en la cara posterior de la torre a la elevación de 1,468.39 msnm (INEGI, 2000).



4.1.3. Cortina

La cortina de una presa es una barrera fabricada de piedra, concreto o materiales graduados, que se construye al paso de un río o arroyo (IMTA, 2016).

Existen clasificaciones de cortinas dependiendo del material, uso y forma. La clasificación de la Comisión Internacional de Presas Grandes (ICOLD por sus siglas en inglés) se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Clasificación de las presas de acuerdo a su tamaño. Fuente: ICOLD.

Parámetro	Tamaño		
	Chica	Mediana	Grande
Altura de la cortina	<10 m	10-15 m	>15 m
Longitud de la corona	<1 km	<500 m	>500 m
Capacidad del vaso	<1 km	<1 Mm ³	1 Mm ³

Según la clasificación de la ICOLD la presa El Rejón es de tamaño grande.

La cortina es de materiales graduados con un corazón central de material impermeable desplantada en una trinchera, la longitud de la corona es de 300 m, el ancho de 8 m a una de elevación 1479.80 msnm, la altura máxima es de 33 m y la base es de 120 m.

El corazón impermeable fue construido con un ancho de 6 m en la parte alta y tiene taludes 0.5:1 sobrepuestos con zonas de material permeable (respaldos) formados por grava y arena hasta el talud exterior de 2:1, en el de aguas arriba se colocó enrocamiento de 1.5 m de espesor y en el de aguas abajo el enrocamiento se redujo a un metro, en la Ilustración 12 se muestra la sección máxima de la cortina.

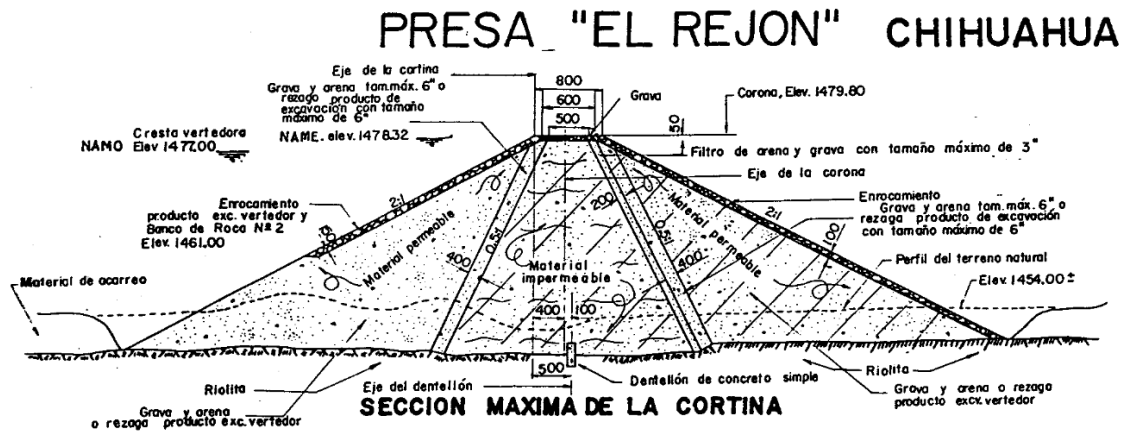


Ilustración 12 Sección máxima de la cortina de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: SSP CONAGUA, 2012.

Fue necesaria la construcción de un dique de las mismas características de la cortina, localizado a la derecha aproximadamente a 300 m y con orientación semejante a la misma, tiene una longitud de 490 m, altura máxima de 10 m y un ancho de corona de 10 m a una elevación de 1479.80 msnm (INEGI, 2000).

4.1.4. Obra de toma múltiple

Las obras de toma son canales o conductos a través de los cuales se extrae el agua de una presa de acuerdo con una ley de demanda determinada. Ésta obedece a los objetivos de la obra: riego, generación de energía, abastecimiento de agua para consumo humano o uso industrial, control de inundaciones (la operación de las presas incluye llevarlas a niveles de almacenamiento adecuado antes de la temporada de lluvias), requerimientos ambientales (gasto ecológico) o recarga de acuíferos (Arreguín F., 2006).

En algunas ocasiones estas obras se utilizan para bajar el nivel del agua, o incluso vaciar el vaso para hacer inspecciones o reparaciones de la cortina, de la obra de excedencias o de la toma misma.

En la presa El Rejón, se construyeron dos obras de toma, la primera y cuyas especificaciones se encuentran en el apartado 4.1.2, fue diseñada y construida para el manejo de las avenidas y control de ellas; está localizada en la estación 0+236.285 en la parte más profunda del cauce.



La segunda obra de toma fue diseñada y construida para dar servicio de agua potable; es una tubería de acero de 8" (20 cm), que se inicia en la pared interior de la torre arriba de la compuerta de servicio a la elevación 1 460.25 m y dispone de una válvula de compuerta de la misma dimensión, con operación desde la plataforma superior de la torre, cruza por la parte de encima de la transición y se aloja en la clave de la galería, donde está instalada una válvula de servicio del mismo diámetro que la válvula de la entrada (INEGI, 2000).

4.1.5. Obra de excedencia

Las obras de excedencia o vertedores de demasías se construyen con el objeto de dar paso a los volúmenes de agua que no pueden retenerse en el vaso de una presa de almacenamiento. En el caso de presas derivadoras por el vertedor pasan las aguas excedentes, que son aquellas que no se han desviado para su aprovechamiento. Mientras que en una presa de almacenamiento se tratará de evitar desfuegos y por lo tanto el uso del (os) vertedor (es), en el caso de las presas derivadoras el funcionamiento de la obra de excedencias será más frecuente y en algunos casos permanente (Arreguín F., 2000).

La obra de excedencia de la presa El Rejón es una estructura de concreto reforzado, formada por un vertedor de cresta libre localizada al extremo izquierdo de la cortina; perfil Creager en abanico, longitud 25 m y un tanque amortiguador de sección trapecial de 95 m. y pendiente de 0.06 m (INEGI, 2000).

La obra de excedencias está diseñada para un gasto máximo regularizado de 80 m³/s con una carga de 1.32 m y deja un bordo libre de 1.48 m.

4.1.6. Datos de construcción, inversión y operación.

El periodo de construcción de la presa El Rejón fue del año 1963 al año 1966 con una inversión de 12 millones de pesos (INEGI, 2000).

La obra fue inaugurada en octubre de 1967 y hasta el año 1998 los asentamientos eran inapreciables, así como los movimientos en otras direcciones.



No se han presentado grietas o fracturas, las filtraciones por cortina y dique prácticamente son nulas, se han observado fugas mínimas en la toma para control, provocadas por la deficiencia en el cierre de la compuerta (SSP CONAGUA, 2012).

4.2. Antecedentes de la cuenca El Rejón

4.2.1. Localización

El punto de salida de la cuenca de estudio “Arroyo El Rejón” se encuentra en el suroeste de la ciudad de Chihuahua en el estado del mismo nombre y es parte de la subcuenca Río Chuvíscar.

En la Ilustración 13 se muestran los datos cartográficos de la cuenca El Rejón, cabe mencionar que una porción de la ciudad de Chihuahua está dentro de la cuenca El Rejón, esto se muestra mejor en la Ilustración 11.

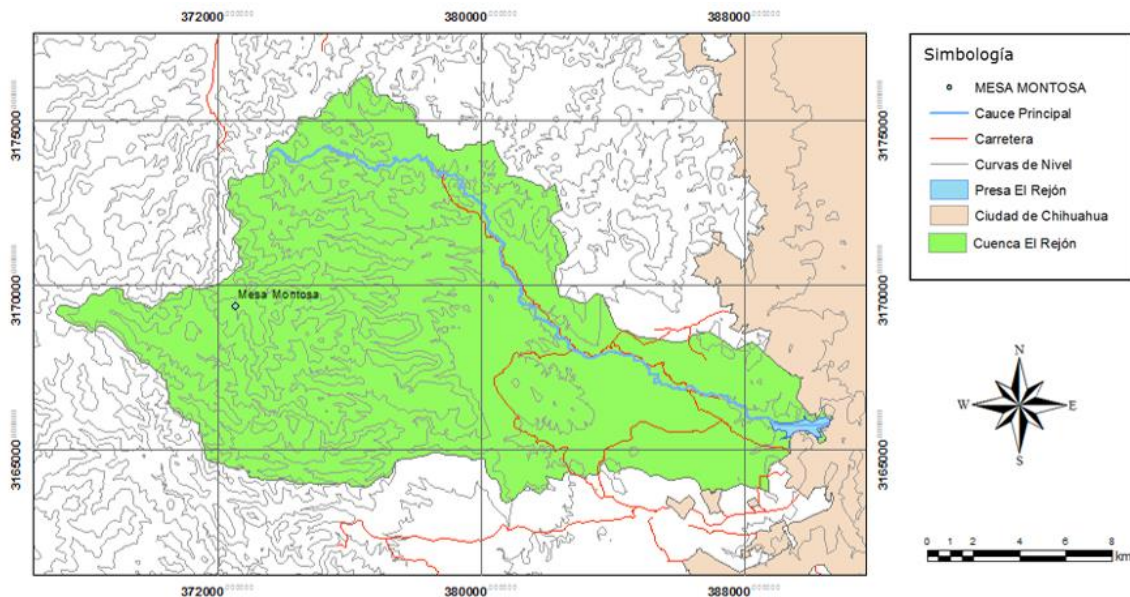


Ilustración 13 Datos vectoriales de la cuenca El Rejón, Chihuahua, Méx. Fuente: INEGI, 2017

4.2.2. Hidrografía

Para desarrollar proyectos hidrológicos es necesario hacer una asociación de los caudales y estudiar las vertientes, para conocer el volumen y tiempo de respuesta.



La cuenca de estudio se encuentra en la región hidrológica 24 Bravo Conchos. A través del portal SIATL (simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas del INEGI) se obtuvo la red hidrográfica escala 1:50,000 con la clave H13C66, la cual se muestra en la Ilustración 14.

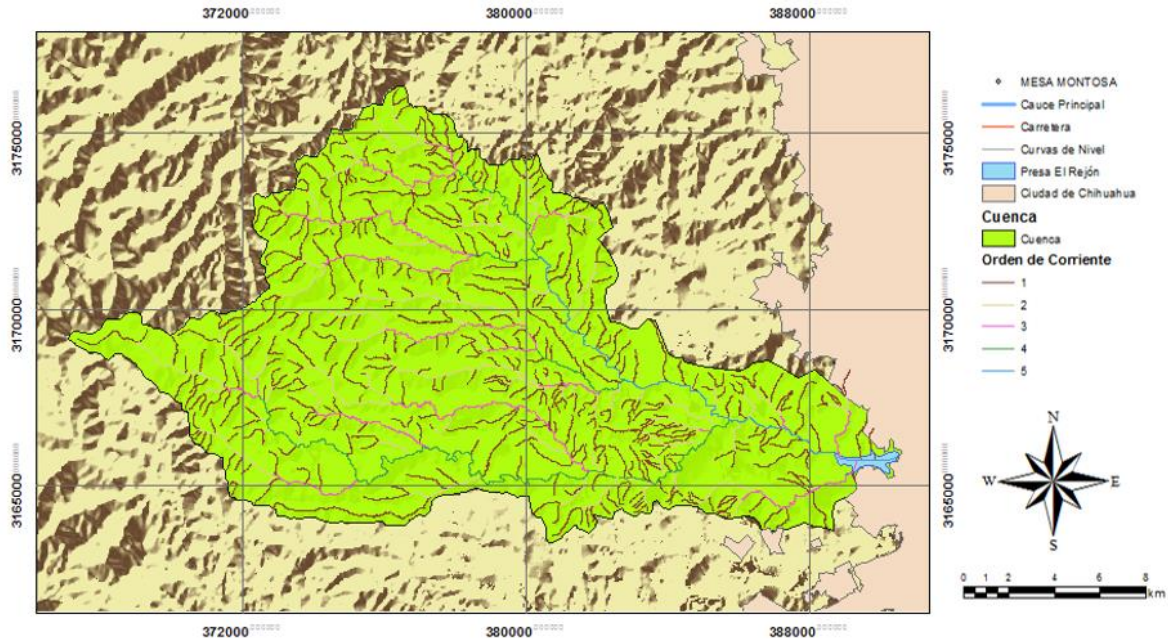


Ilustración 14 Hidrografía de la cuenca El Rejón. Fuente INEGI, 2017.

En cuestión de comportamiento la cuenca es exorreica, es decir que el agua escurre al punto más bajo y éste a su vez al Río Chuvíscar que es un afluente del río Conchos que después llega al río Bravo para desembocar en el océano Atlántico.

El orden de la corriente es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca (Aranda D., 1984), Según la clasificación de Horton se indica que la cuenca de la presa El Rejón es de orden 5.

4.2.3. Edafología

Es la información geoespacial que muestra la distribución de los principales tipos de suelo en el territorio nacional, así como los atributos y limitantes físicos y químicos presentes, en este caso se consideró la base referencial mundial del recurso suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).



En la cuenca de estudio se localizan seis tipos de suelo en su primer estrato (Ilustración 15):

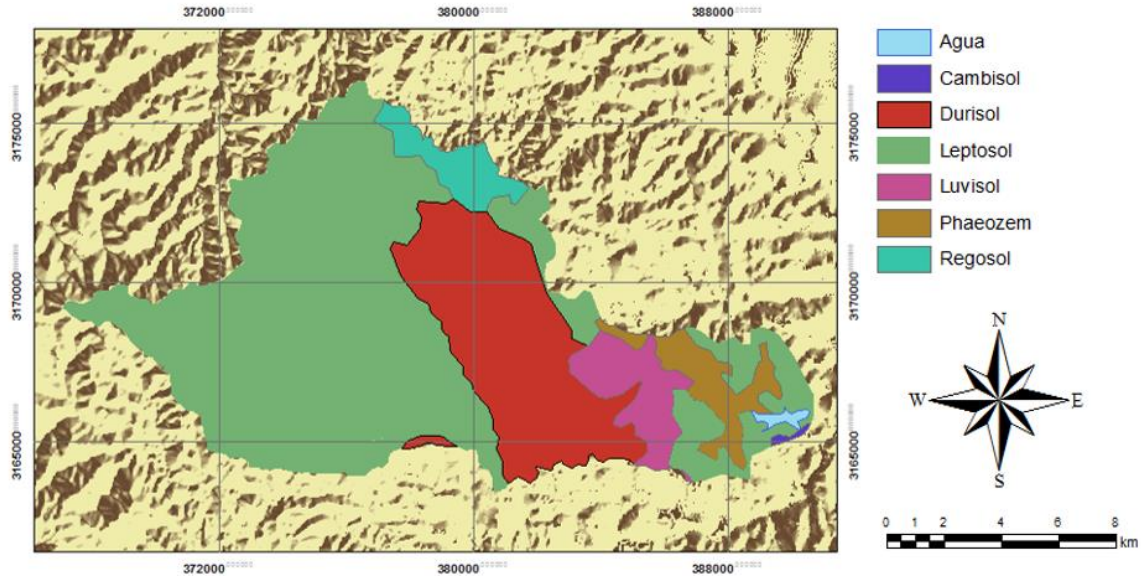


Ilustración 15 Edafología de la cuenca El Rejón. Fuente: INEGI, 1994.

A continuación en la Tabla 14 se clasifican los suelos que conforman la cuenca de estudio según la FAO y su relación de área y porcentaje correspondiente.

Tabla 14 Tipo de suelo en el primer estrato de la cuenca de la presa El Rejón. Fuente INEGI, 1994.

Tipo de suelo en el primer estrato	Área correspondiente, km ²	Porcentaje de cada tipo, %
Agua	0.58	0.39
Cambisol	0.22	0.14
Durisol	32.71	21.86
Leptosol	95.91	64.08
Luvisol	7.92	5.29
Phaeozem	6.76	4.52
Regosol	5.57	3.72
Total	149.69	100.00

- **Cambisol.** Se desarrolla sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial, aparecen sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación.
- **Durisol.** El material original lo constituyen depósitos aluviales o coluviales con cualquier textura. Se asocia con un clima árido, semiárido y mediterráneo. El relieve es llano o suavemente ondulado, principalmente llanuras aluviales, terrazas y suaves pendientes de pie de monte. La mayoría de los durisoles solo pueden ser usados para pastizales extensivos. En zonas donde el regadío es posible, pueden utilizarse para cultivos.



- **Leptosol.** El material original puede ser tanto rocas como materiales no consolidados con menos del 10 % de tierra fina. Aparece fundamentalmente en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevadas pendientes. Se encuentran en todas las zonas climáticas y, particularmente, en áreas fuertemente erosionadas.
- **Luvisol.** Se desarrolla principalmente sobre una gran variedad de materiales no consolidados como depósitos glaciares, eólicos, aluviales y coluviales. Predomina en zonas llanas o con suaves pendientes de climas templados, fríos o cálidos, pero con una estación seca y otra húmeda, como el clima mediterráneo. Cuando el drenaje interno es adecuado, presenta una gran potencialidad para un gran número de cultivos a causa de su moderado estado de alteración y su alto grado de saturación.
- **Phaeozem.** Es un suelo oscuro y rico en materia orgánica. Suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental.
- **Regosol.** Se desarrolla sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Aparece en cualquier zona climática sin permafrost y a cualquier altitud. Son muy comunes en zonas áridas, en los trópicos secos y en las regiones montañosas.

4.2.4. Uso de suelo y cobertura vegetal

El conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación (land use land cover LULC, por sus siglas en inglés) serie VI fue obtenida por medio de imágenes del satélite LANDSAT 8, analizadas, procesadas y distribuidas por el INEGI para México en el año 2017.

El uso de suelo y vegetación de la cuenca El Rejón se presenta en la Tabla 15 y en la Ilustración 16:

Tabla 15 Uso de suelo y vegetación en la cuenca El Rejón. Fuente INEGI, 2017.

Uso de suelo y vegetación	Área con respecto al total, km ²	Porcentaje correspondiente, %
Agricultura temporal anual	12.09	8.08
Agua	0.58	0.39
Área desprovista de vegetación	0.32	0.22
Bosque de encino	57.89	38.68
Matorral desértico microfilo	38.12	25.47
Pastizal inducido	36.82	24.60
Urbano construido	3.85	2.57
Total	149.69	100



- **Agricultura temporal anual.** Se clasifica como tal al tipo de agricultura de todos aquellos terrenos en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende del agua de lluvia, por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua, su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo.
- **Agua.** El vaso de la presa El Rejón está lleno de agua, por lo que la cobertura vegetal que se espera que tenga el suelo sobre el cual está soportada es de plantas acuáticas, musgo y sedimentos que son arrastrados por el agua hasta el vaso.
- **Área desprovista de vegetación.** En este concepto se incluyen aquellas sin vegetación aparente, tales como arenales, dunas, depósitos de litoral, bancos de ríos, etc.
- **Bosque de encino.** Junto con los bosques de pino, los bosques de encino representan un tipo importante de vegetación templada de México, dando origen a los denominados bosques de encino-pino.
- **Matorral desértico microfilo.** Predominan las plantas de hoja pequeña que incluyen casi siempre a arbustos de 2 a 3 m de altura.
- **Pastizal inducido.** Esta comunidad resulta de la perturbación que produce el hombre al abrir zonas donde la vegetación prístina era el bosque de encino-pino, para sustituirlas por éste otro tipo de comunidad y sostener así hatos de borregos en un régimen de ganadería extensiva.
- **Urbano construido.** Conglomerado demográfico, considerando dentro del mismo la construcción de vialidades de concreto, asfalto o tierra, centros comerciales o industriales y zonas habitadas.

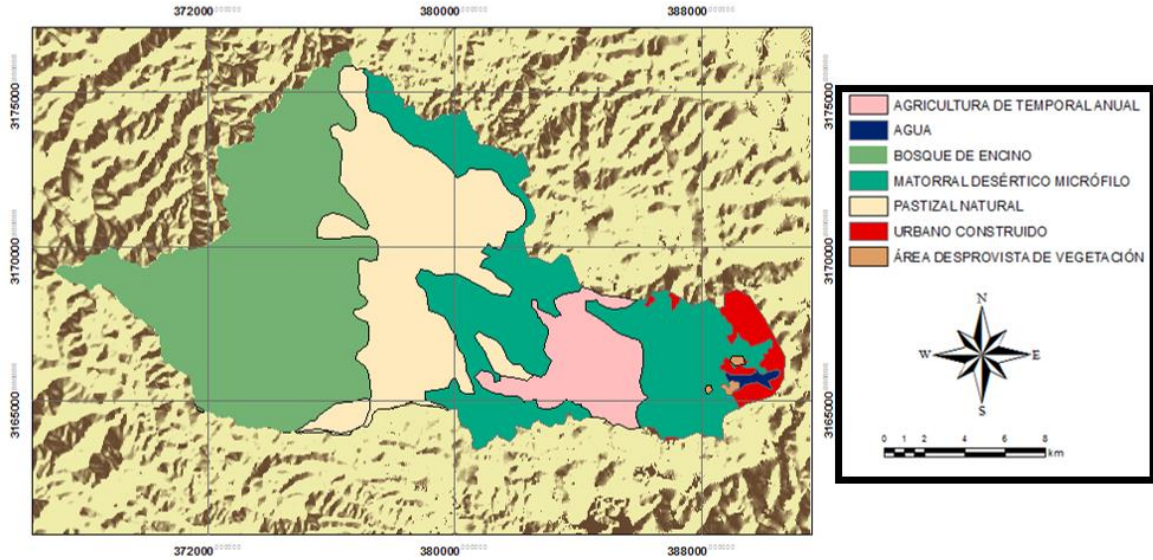


Ilustración 16 Uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca El Rejón. Fuente: INEGI, 2017.

4.2.5. Área y perímetro de la cuenca

Una cuenca tiene su superficie perfectamente definida por su contorno y es el área de drenaje comprendida desde la línea de división del agua, hasta el punto convenido, pueden ser estación de aforos presas o desembocadura y el perímetro de una cuenca es la longitud del contorno del área (IHHS, 1995).

El área de la cuenca El Rejón es de 149.69 km² y el perímetro de 72.19 km, la cuenca puede clasificarse como pequeña como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16 Clasificación de las cuencas dependiendo de su tamaño. Fuente: Campos D., 1998.

Tamaño de la cuenca, km ²	Clasificación
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia pequeña
500 a 2,500	Intermedia grande
2,500 a 5,000	Grande
> 5,000	Muy grande



4.2.6. Longitud del cauce principal

Es la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Asensio I., 2017).

Por medio de los datos vectoriales que presenta el simulador de flujos de agua en cuencas hidrográficas del INEGI (Ilustración 17) se obtuvo la longitud del cauce principal de 26.06 km.

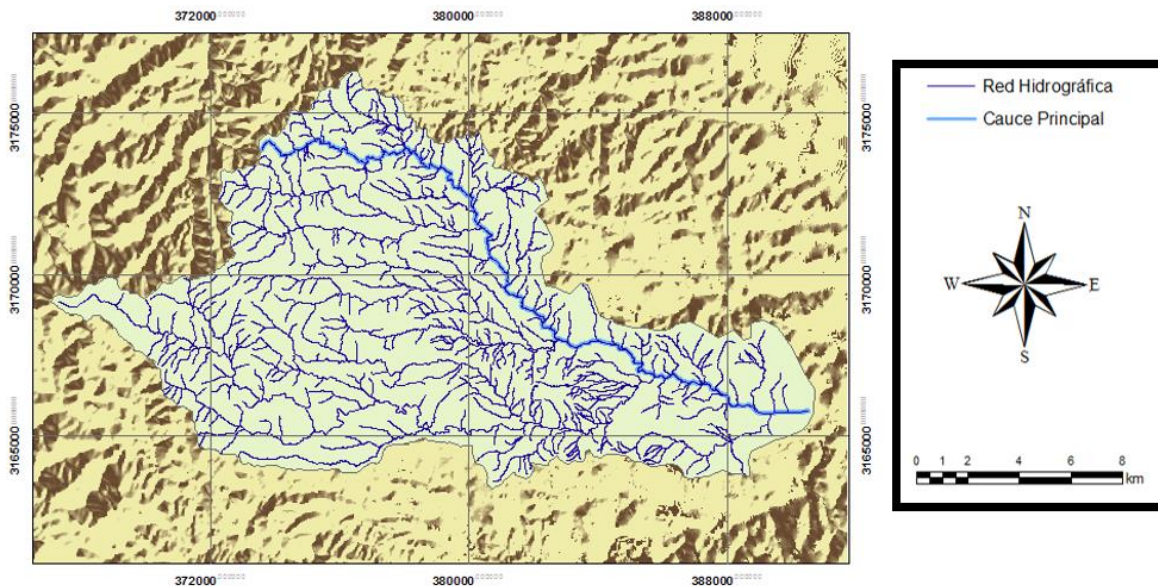


Ilustración 17 Red hidrográfica. Fuente: SIATL INEGI.

4.2.7. Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce principal está relacionada directamente con el régimen hidráulico del flujo (Campos A., 1998). Es un indicador importante de la respuesta hidrológica de la cuenca. A mayor pendiente en un cauce, la acumulación de escurrimiento y su velocidad es mayor con respecto a un cauce con una pendiente baja. En la Ilustración 18 se muestra el perfil del cauce principal.

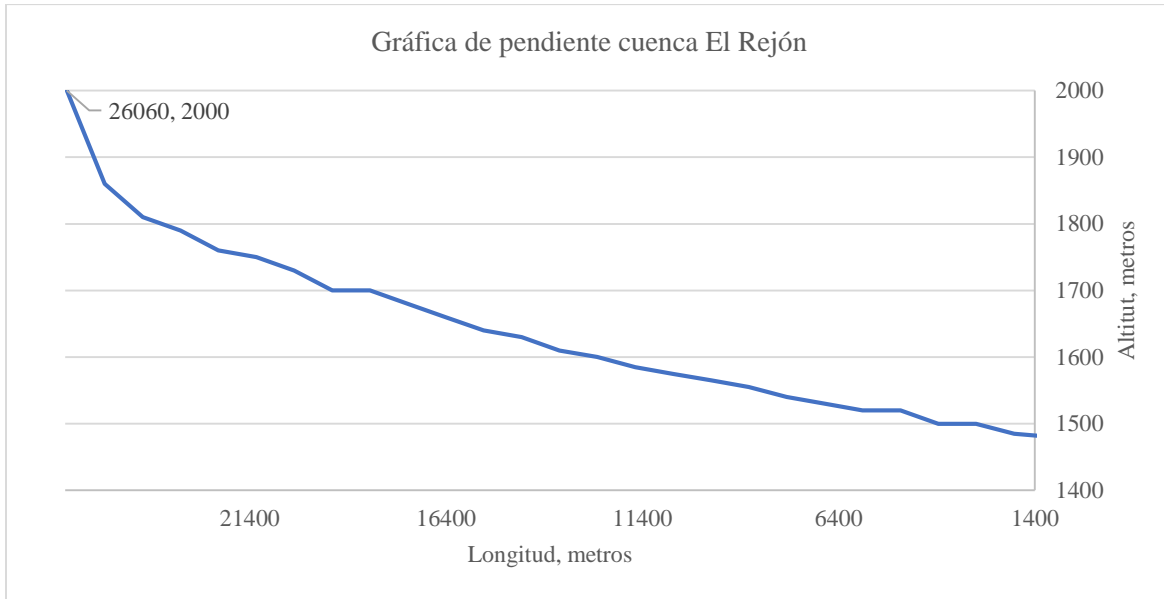


Ilustración 18 Gráfica de pendiente de la cuenca El Rejón. Fuente: SIATL INEGI.

Taylor y Schwarz propusieron la ecuación 4.1 para el cálculo de la pendiente del cauce principal.

$$S = \left(\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \frac{1}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right)^2$$

4. 1

Donde:

S= Pendiente media del cauce principal, adimensional

Si= Pendiente de cada tramo.

m= Número de tramos de igual longitud en los que se dividió el cauce.

Los resultados indicados en la Tabla 17 muestran que la pendiente del cauce principal es de 0.0216 es decir del 2.16 %.



Tabla 17 Método de Taylor y Schwarz por longitud constante para obtener la pendiente del cauce principal. Fuente: Elaboración propia.

Sección	Longitud	Elevación 1	Elevación 2	Y	Si	Si ^(1/2)	1/Si ^(1/2)
1	965.19	1480	1480	0	0.00	0.00	0.00
2	965.19	1480	1485	5	0.01	0.07	13.89
3	965.19	1485	1500	15	0.02	0.12	8.02
4	965.19	1500	1500	0	0.00	0.00	0.00
5	965.19	1500	1520	20	0.02	0.14	6.95
6	965.19	1520	1520	0	0.00	0.00	0.00
7	965.19	1520	1530	10	0.01	0.10	9.82
8	965.19	1530	1540	10	0.01	0.10	9.82
9	965.19	1540	1555	15	0.02	0.12	8.02
10	965.19	1555	1565	10	0.01	0.10	9.82
11	965.19	1565	1575	10	0.01	0.10	9.82
12	965.19	1575	1585	10	0.01	0.10	9.82
13	965.19	1585	1600	15	0.02	0.12	8.02
14	965.19	1600	1610	10	0.01	0.10	9.82
15	965.19	1610	1630	20	0.02	0.14	6.95
16	965.19	1630	1640	10	0.01	0.10	9.82
17	965.19	1640	1660	20	0.02	0.14	6.95
18	965.19	1660	1680	20	0.02	0.14	6.95
19	965.19	1680	1700	20	0.02	0.14	6.95
20	965.19	1700	1700	0	0.00	0.00	0.00
21	965.19	1700	1730	30	0.03	0.18	5.67
22	965.19	1730	1750	20	0.02	0.14	6.95
23	965.19	1750	1760	10	0.01	0.10	9.82
24	965.19	1760	1790	30	0.03	0.18	5.67
25	965.19	1790	1810	20	0.02	0.14	6.95
26	965.19	1810	1860	50	0.05	0.23	4.39
27	965.19	1860	2000	140	0.15	0.38	2.63
Suma							183.55
Pendiente media de la cuenca							0.0216



4.2.8. Información pluviométrica

Las estaciones climatológicas más cercanas a la zona de estudio se muestran en la Ilustración 19. La estación Observatorio (8040) se encuentra dentro de la ciudad de Chihuahua, la estación presa El Rejón DGE (8114) se encuentra en el centro de la cuenca de estudio y la estación presa Chihuahua DGE (8185) está entre los vasos de la presa Chihuahua y la presa El Rejón.

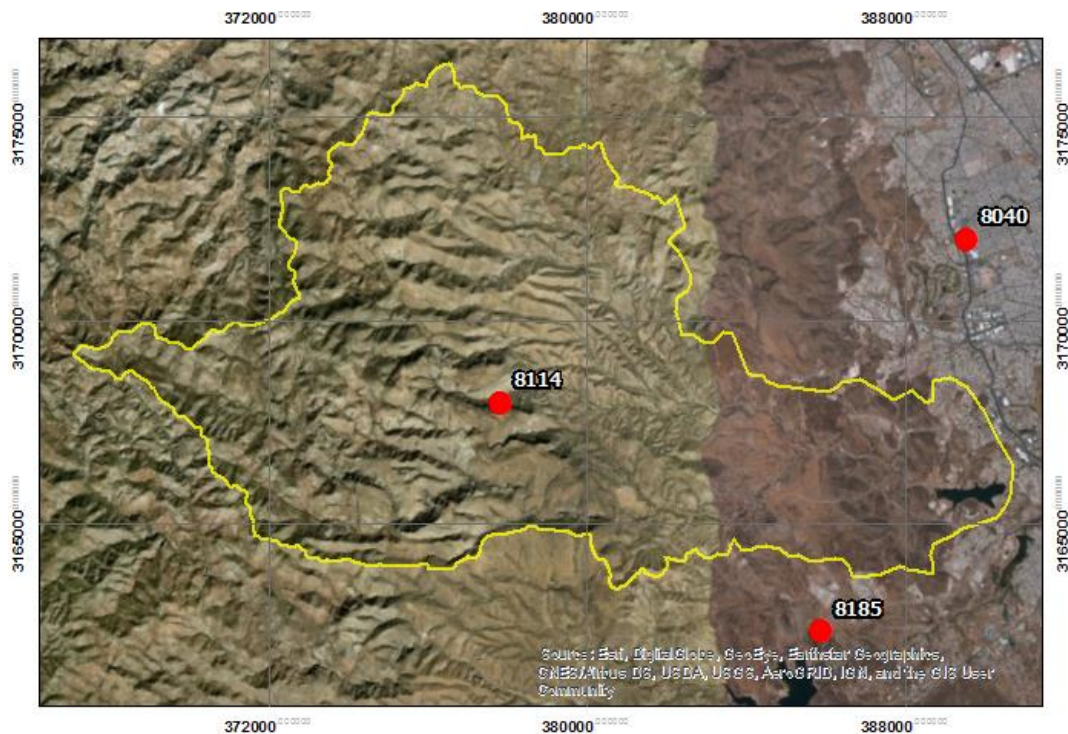


Ilustración 19 Estaciones climatológicas convencionales circundantes a la cuenca de la presa El Rejón. Fuente: Climate Computing Project, CLICOM, 2018.

En la Tabla 18 se muestran las estaciones climatológicas convencionales que fueron utilizadas, ya que eran las más cercanas a la zona de estudio.

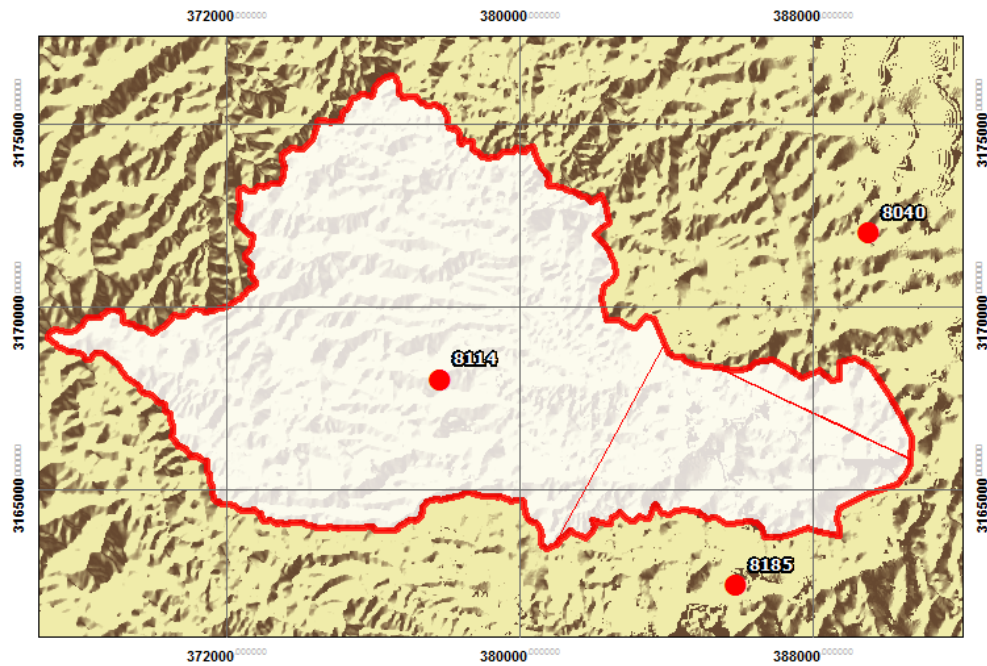
Tabla 18 Estaciones climatológicas convencionales analizadas para el estudio de la presa El Rejón.-Fuente: CLICOM 2018

Tipo de estación	Clave	Nombre	Estatus	Longitud	Latitud	Periodo, años	Años de registro
ECC	8040	Chihuahua Observatorio	Activa	28.6705555556N	-106.1186111111W	61	1951-2011
ECC	8114	Presa El Rejón (DGE)	Activa	28.6333333333N	-106.254166667W	43	1969-2011
ECC	8185	Presa Chihuahua (DGE)	Activa	28.5833333333N	-106.169444444W	51	1961-2011



4.2.9. Precipitación media en la cuenca

Para determinar la precipitación media de una cuenca primero es necesario determinar el porcentaje de influencia que tiene cada una de las estaciones del caso de estudio sobre la misma por medio de la técnica de polígonos de Thiessen que se muestra en la Ilustración 20.



	8114.-Presa El Rejón	8185.-Presa Chihuahua	8040.-Observatorio	Total
Área, km ²	116.76	27.23	5.67	149.69
Porcentaje %	78.02	18.19	3.79	100.00

Ilustración 20 Polígonos de Thiessen a partir de las ECC seleccionadas para el análisis de precipitación. Fuente: CLIMOM V 3.2.

La información que se utiliza de las estaciones escogidas para el proyecto es la precipitación máxima anual (PMA) como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19 Precipitación media anual de la presa El Rejón. Fuente: CLICOM V 3.2.

Datos	8114- Presa El Rejón	8185-Presa Chihuahua	8040-Observatorio	Cuenca presa El Rejón
PMA Histórico, mm	100	116.5	115	
PMA (1969-2011)	100	101	115	
Área, km ²	116.76	27.23	5.67	149.69
Influencia sobre la cuenca, %	78.02	18.19	3.79	100.00
Precipitación ponderada, mm	78.02	18.37	4.35	100.74



Capítulo V: Metodología

En este capítulo se desarrolla cada una de las técnicas y métodos para ejecutar las tareas relacionadas con la construcción del modelo basado en autómatas celulares, la obtención de las anomalías de cambio climático tomadas del ACDM en la zona de estudio y la vinculación del modelo y el índice con el cálculo del gasto máximo de diseño para la presa El Rejón Ilustración 21.

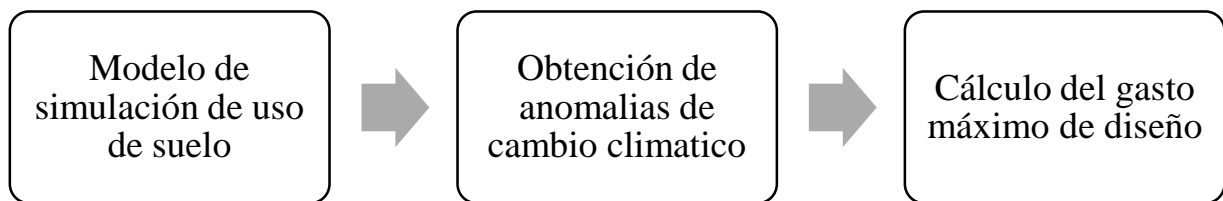


Ilustración 21 Metodología propuesta para la estimación del gasto máximo de diseño mediante el uso de autómatas celulares y anomalías de cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

5.1. Modelo de simulación de cambio de suelo y cobertura vegetal

El desarrollo de modelos espaciotemporales, en los que el estado o atributo de una determinada ubicación geográfica cambia a lo largo del tiempo como respuesta a un conjunto de conductores, es un requisito fundamental para la modelación ambiental de cambio de uso de suelo y, por lo tanto, abre una vía de posibilidades para la representación de los fenómenos dinámicos (Britaldo S., 2009).

Para la modelación de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal se usó el programa DINAMICA EGO por ser un software de acceso libre y con diversas aplicaciones que respaldan su uso.

Para la construcción del modelo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca El Rejón se usaron de base los mapas correspondientes a los años 1984 y 2003; para la validación del modelo se usó el mapa del año 2017 como se muestra en la Ilustración 22.



El INEGI cuenta con 6 series de datos vectoriales de uso de suelo para la cuenca El Rejón correspondientes a los años 1984, 1993, 2003, 2008, 2013 y 2017; de los cuales se consideró usar la serie I, la serie III y la Serie VI para tener un panorama de tiempo extendido que comprenda todos los datos históricos. En la Tabla 20 se desarrollan las clases de cobertura y uso de suelo que tienen estas series.

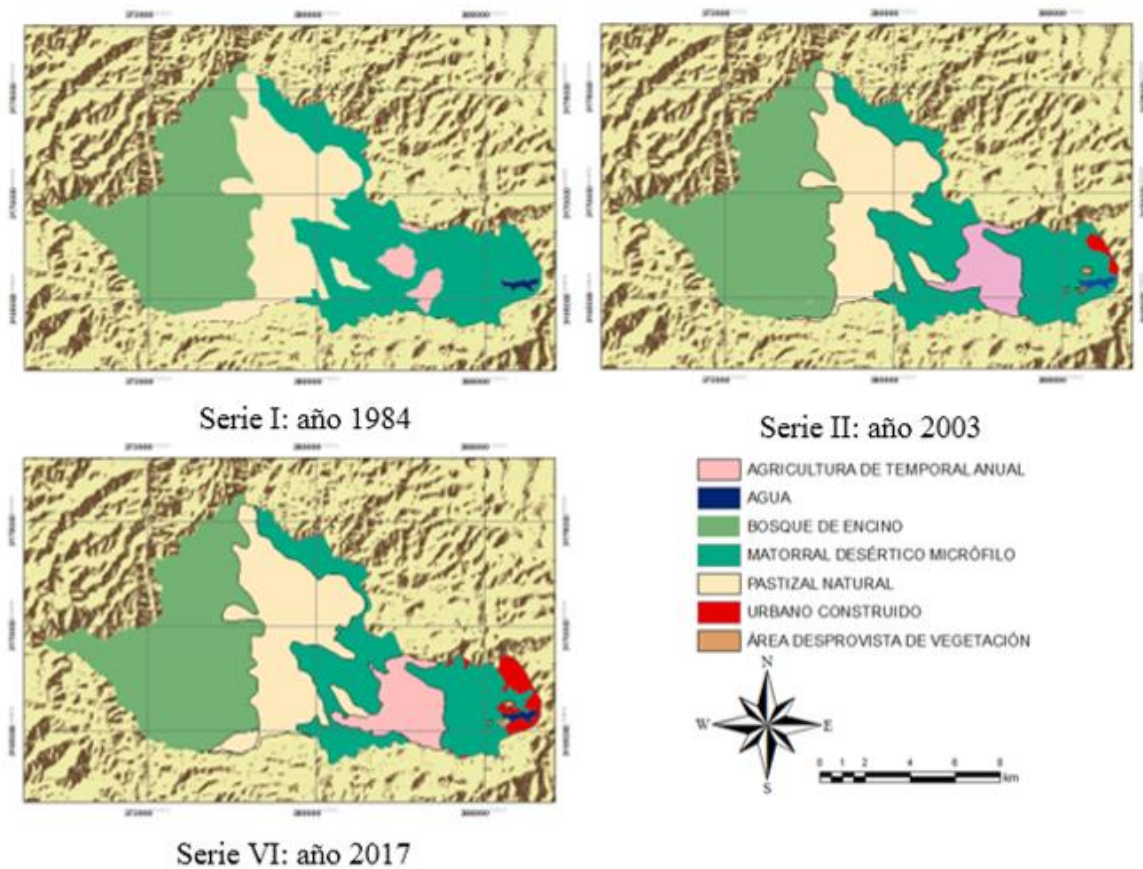


Ilustración 22 Mapas de uso de suelo y vegetación utilizados para construir el modelo de predicción en la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chihuahua, México. Fuente: INEGI 1984, 2003 y 2017.



Tabla 20 Áreas de las clases de cobertura y uso de suelo para la modelación con autómatas celulares en la cuenca El Rejón Chihuahua, Chih., México. Fuente: INEGI 1984, 2003 y 2017.

Clave	Uso de suelo y vegetación	1984-serie I		2003-serie III		2017-serie VI	
		Área, km ²	Porcentaje correspondiente, %	Área, km ²	Porcentaje correspondiente, %	Área, km ²	Porcentaje correspondiente, %
5	Agricultura de temporal anual	4.17	2.79	10.08	6.73	12.09	8.08
2	Agua	0.58	0.39	0.58	0.39	0.58	0.39
7	Área desprovista de vegetación	N/A	N/A	0.25	0.17	0.32	0.22
3	Bosque de encino	55.49	37.07	59.35	39.65	57.89	38.68
1	Matorral desértico microfilo	51.60	34.47	42.54	28.42	38.12	25.47
4	Pastizal natural	37.85	25.29	35.87	23.96	36.82	24.60
6	Urbano construido	N/A	N/A	1.02	0.68	3.85	2.57
	Total	149.69	100	149.69	100	149.69	100

5.1.1. Cálculo de matrices de transición de Márkov

La matriz de transición describe un sistema que cambia 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 (Britaldo S., 2009).

La línea diagonal de la matriz de transición no necesita ser especificada ya que DINAMICA EGO no modela el porcentaje de celdas inmutables, ni las transiciones que son iguales a cero.

La tasa de transición se puede pasar al modelo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal como un parámetro fijo o se puede ser actualizado desde la retroalimentación del modelo.

Las tasas de transición establecen la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje de tierra que cambiará a otro estado (uso de la tierra y atributo de cobertura) y, por lo tanto, se conocen como tasas netas, siendo adimensionales (Britaldo S., 2009).

El modelo de DINAMICA EGO de la Ilustración 23 calcula las matrices de transición para 1 año o para el número de año que se designen, entre los mapas de 1984 y 2003; donde existe un rango de 19 años por lo que éste será también el número de pasos para determinar la matriz.

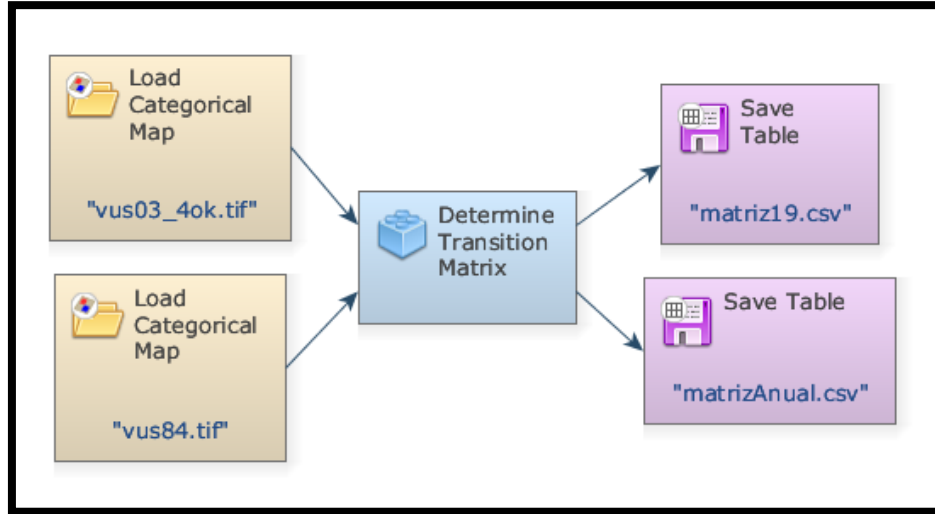


Ilustración 23 Modelo de matrices de transición de un paso y de pasos múltiples. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO.

En la Tabla 21 y en la Tabla 22 se muestran las tasas de transición que se establecieron entre los mapas de uso de suelo y vegetación usando como insumo los mapas de los años 1984 y 2003.

Tabla 21 Matriz de transición de un paso para los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1984 y 2003. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO.

Desde/Hacia		1	2	3	4	5	6	7
		Matorral desértico microfilo	Agua	Bosque de encino	Pastizal natural	Agricultura temporal anual	Urbano construido	Área desprovista de vegetación
1	Matorral desértico microfilo	XXXX	--	--	0.0643081	0.1122664	0.0195599	0.0050434
2	Agua	--	XXXX	--	--	--	--	--
3	Bosque de encino	--	--	XXXX	0.0111356	--	--	--
4	Pastizal natural	0.0448864	--	0.1170373	XXXX	0.0053613	--	--
5	Agricultura temporal anual	0.0460455	--	--	--	XXXX	--	--
6	Urbano construido	--	--	--	--	--	XXXX	--
7	Área desprovista de vegetación	--	--	--	--	--	--	XXXX



Tabla 22 Matriz de transición de 19 pasos para los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1984 y 2003. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO

Desde/Hacia		1	2	3	4	5	6	7
		Matorral desértico microfilo	Agua	Bosque de encino	Pastizal natural	Agricultura temporal anual	Urbano construido	Área desprovista de vegetación
1	Matorral desértico microfilo	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

Como se busca determinar el cambio en el tiempo, desde la matriz de transición de 19 pasos se comparan las tasas netas de cambio entre clases y se determinaron las de mayor peso:

Las mayores transiciones que ocurren son desde la clase de matorral desértico microfilo (1) hacia el urbano construido (6) con una tasa de 2.44% anual, hacia el área desprovista de vegetación (7) con una tasa anual de 0.63% y hacia la clase de agricultura temporal anual (5) con una tasa anual de 0.67%.

Otra transición que es importante resaltar es la de bosque de encino (3) que cambia a la clase de pastizal natural (4) con una tasa anual de 0.64%. Según la definición de pastizal natural de la clase 4, a partir de aquí ya no es natural, es inducido por la deforestación.

5.1.2. Cálculo de rangos para categorizar las variables continuas

Para desarrollar un modelo de predicción, además de utilizar los mapas de uso de suelo y vegetación es necesario generar mapas cualitativos para sintetizar los pesos de evidencia.

Estos mapas son los insumos que ayudan a generar una tendencia por donde los autómatas celulares extienden los píxeles de las clases:



- Mapa de caminos
- Mapa de modelo digital de elevaciones
- Mapa de pendientes
- Mapa de distancia euclidiana a la presa El Rejón
- Mapa de uso de suelo y vegetación del año 1984

El primer mapa que se encuentra como insumo es el de caminos Ilustración 24, debido a que el paso de la humanidad tiende a cambiar las condiciones de la naturaleza, por lo que la cercanía a los caminos es un factor de cambio en el uso de suelo y vegetación existente.

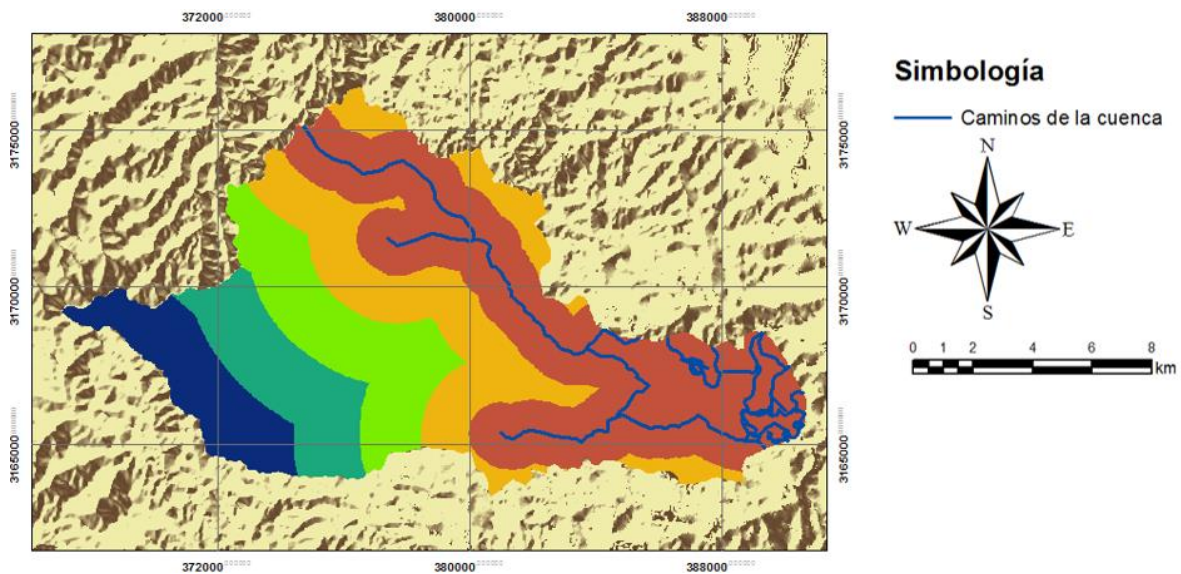


Ilustración 24 Mapa de caminos locales y rurales de la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI 2017.

El segundo mapa que se usa como insumo es el modelo digital de elevaciones Ilustración 25, debido a que la dirección del escurrimiento depende directamente de éste.

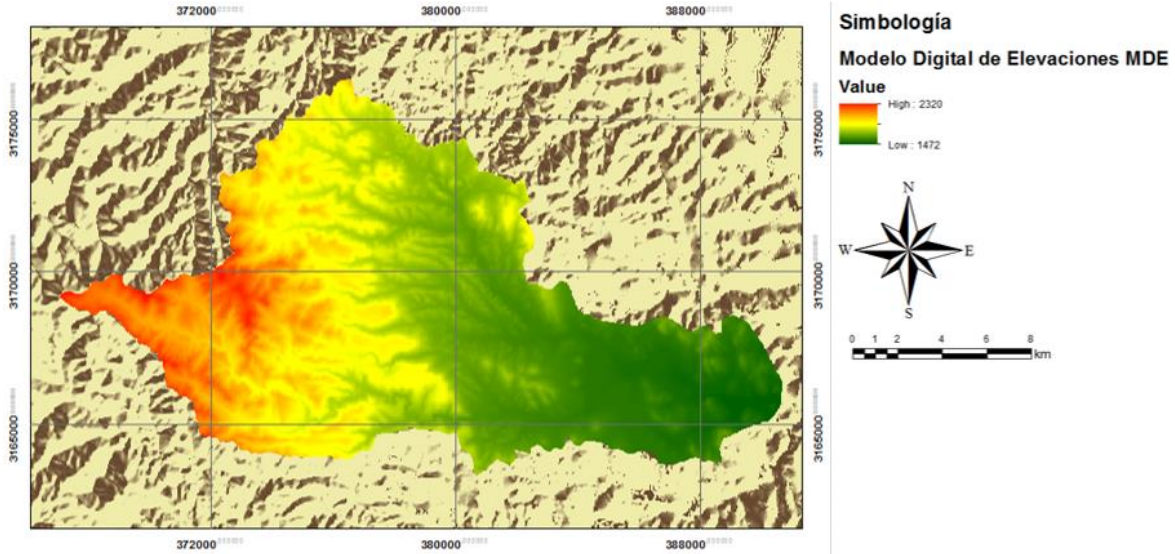


Ilustración 25 Modelo digital de elevación de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con datos del CLICOM.

El tercer mapa de insumo es el de pendientes Ilustración 26, como un complemento al modelo digital de elevaciones.

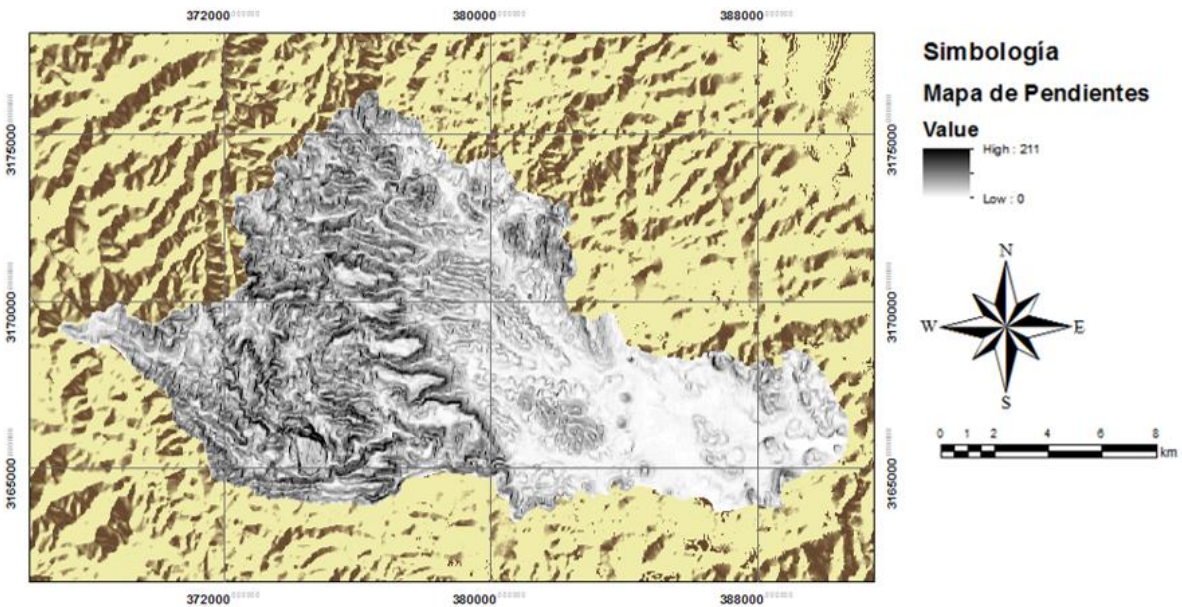


Ilustración 26 Mapa de pendientes presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con información del INEGI, 1996.

El cuarto mapa de insumo es la distancia euclidiana a la presa El Rejón Ilustración 27, la distancia euclidiana tiene sus bases en el teorema de Pitágoras como se muestra en la ecuación 5.1, sobre triángulos rectángulos, donde la distancia euclidiana es la longitud de la hipotenusa entre un punto P y un punto Q.



$$d_E(P, Q) = \sqrt{(p_1^2 + q_1^2) + (p_2^2 + q_2^2) + (p_3^2 + q_3^2) + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i^2 + q_i^2)}$$

5. 1

Donde:

P y Q= Puntos en el espacio euclidiano n dimensional.

Este mapa mide la distancia entre el uso de suelo y vegetación con el agua, las implicaciones antropológicas que afectan el suelo son comúnmente vinculadas a las extensiones de agua, es decir, que el ser humano tiende a desarrollarse cerca de los cuerpos de agua, por lo que entre más cerca se encuentre del vaso de la presa es mayor la afectación al uso de suelo.

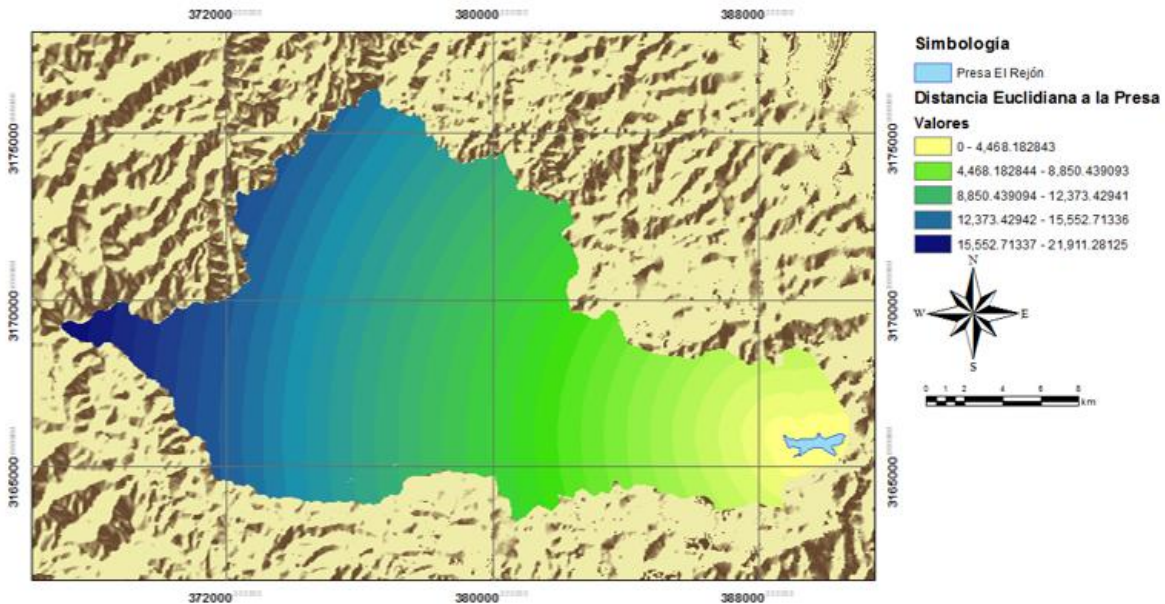


Ilustración 27 Mapa de distancia euclidiana a la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuentes: Elaboración propia con datos vectoriales del INEGI, 1996.

Con los mapas de insumos descritos y los mapas de uso de suelo y vegetación de los años 1984 y 2003 se calculan los rangos de los pesos de evidencia, es decir se analiza que tanto afecta cada mapa a la generación y expansión de nuevos pixeles.



Considerando las transiciones de la Tabla 22:

- 1-----→7
- 1-----→6
- 1-----→5
- 3-----→4

Se determina el efecto que cada insumo tiene para cada transición de clase, donde automáticamente el software DINAMICA EGO establece un incremento estándar de 1.0 para que posteriormente puedan ser modificados según sea conveniente.

Por ejemplo, para la transición 1→5 se determina que el insumo que tiene mayor peso es el mapa de caminos Ilustración 28. Esto obtenido de las iteraciones realizadas con los pesos de evidencia del subcapítulo siguiente (4.1.3).

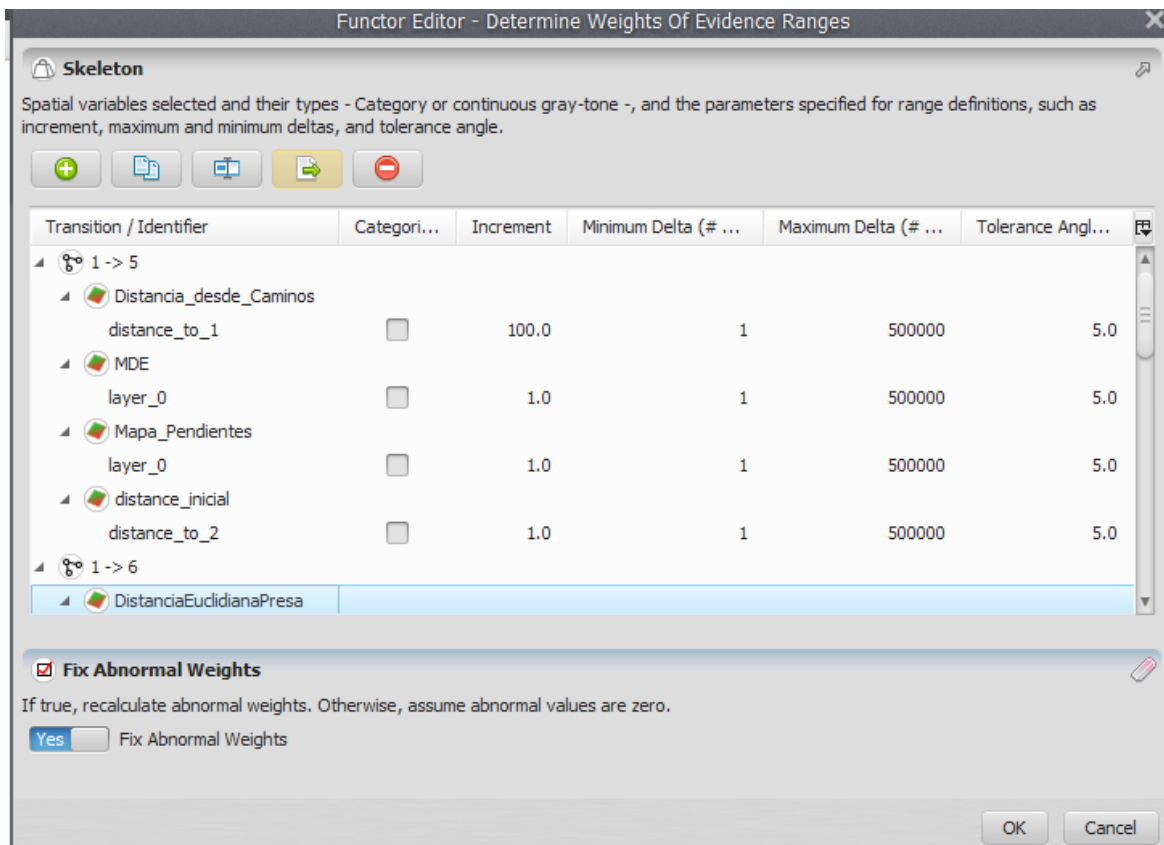


Ilustración 28 Cuadro de determinación de los rangos de los pesos de evidencia de la transición 1-->5 del modelo de predicción de uso de suelo y vegetación de la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.



Para cada transición es necesario determinar la importancia de los insumos en incrementos mínimos por unidad de mapa, los resultados se encuentran en la Tabla 23.

Tabla 23 Importancia de los insumos para las transiciones del modelo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.

Insumo/Transición	1→7	1→6	1→5	3→4
Caminos	100	100	100	100
MDE	100	100	1	100
Pendientes	1	10	1	10
Distancia euclidiana	0	1	0	0
Mapas iniciales	100	10	1	400

5.1.3. Cálculo pesos de evidencia

El método pesos de evidencia se aplica en DINAMICA EGO para producir un mapa de probabilidad de transición, que representa las áreas más favorables para un cambio de clases (Soares F., et al., 2004).

Los pesos de evidencia consisten en un método bayesiano, en el que el efecto de una variable espacial en una transición se calcula independientemente de una solución combinada. Los pesos de evidencia representan la influencia de cada variable en la probabilidad espacial de una transición ij (Britaldo S., 2009).

El modelo de cálculo de rangos para categorizar las variables que tienen los mapas insumo genera un editor de pesos de evidencia que se muestra en la Ilustración 29

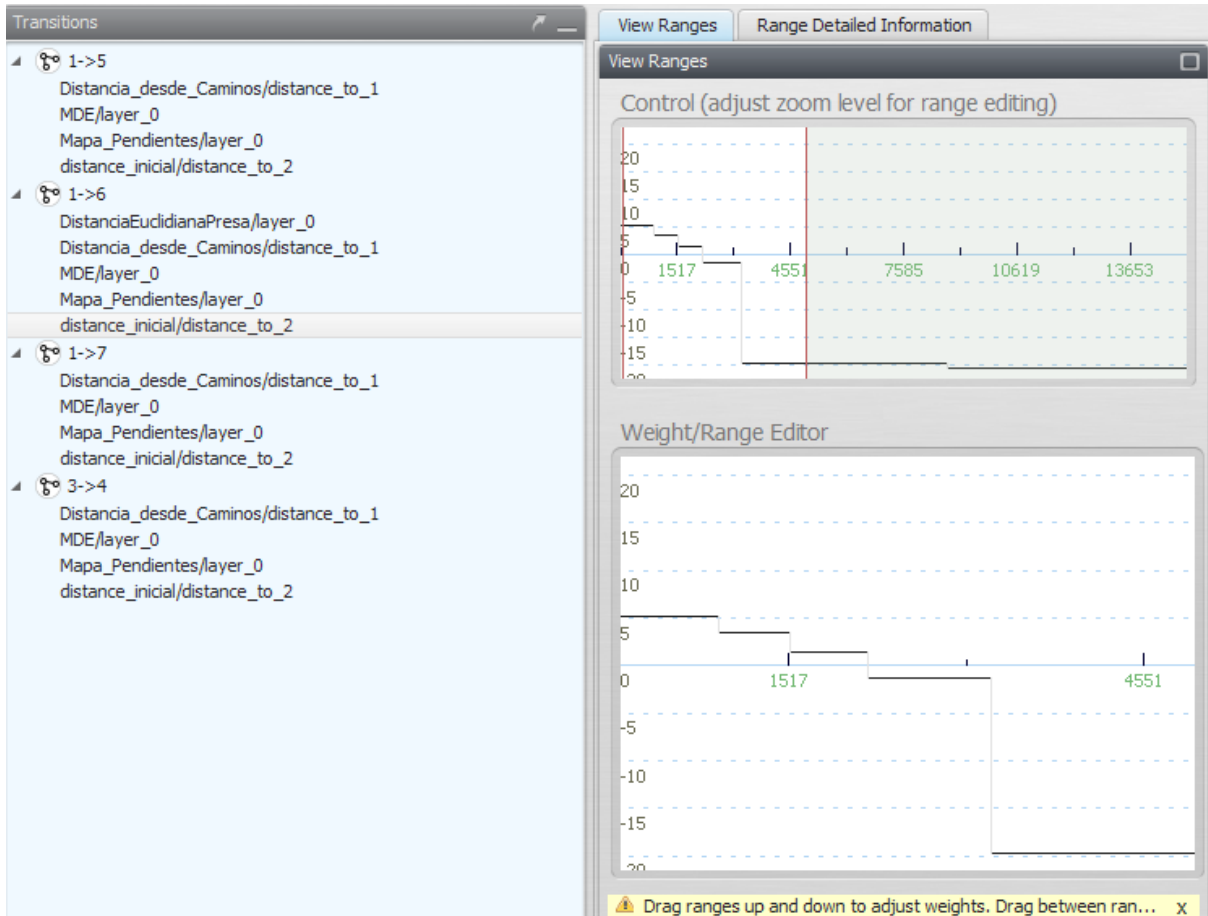


Ilustración 29 Editor de pesos de evidencia del modelo de cambio de uso de suelo y vegetación de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.

Este editor de pesos de evidencia permite realizar adecuaciones puntuales al modelo para variar sus parámetros y optimizarlos.

Además, en la ventana de registro se confirma que existe una correlación significativa de cada transición con el insumo que se dispuso como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24 Significancia de cada insumo para cada transición del modelo de predicción de uso de suelo de la presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.

Insumo/Transición	Rangos de análisis por transición			
	1→7	1→6	1→5	3→4
Caminos	2/4=50%	3/4=75%	6/8=75%	7/19=36%
MDE	2/4=50%	3/4=75%	11/15=73%	5/6=83%
Pendientes	8/9=88%	2/2=100%	11/11=100%	4/4=100%
Distancia euclidiana	N/A	3/16=18%	N/A	N/A
Mapas Iniciales	3/5=60%	5/8=62%	18/40=45%	6/9=66%



Esto significa que entre cada insumo existe una correlación de un porcentaje dado para cada transición, será necesario realizar adecuaciones manuales para variar los resultados hasta llegar a una aproximación más detallada, es decir, si en la transición 1→6 se necesita que el insumo de distancia euclidiana a la presa afecte el movimiento de los autómatas celulares para crear o expandir pixeles se tendrá que aumentar el peso con el que este insumo influye en la transición.

5.1.4. Correlación entre mapas

El único supuesto para el método de pesos de evidencia es que los mapas de entrada tienen que ser espacialmente independientes. Se puede aplicar un conjunto de medidas para evaluar este supuesto, como la prueba de Cramer y la información de incertidumbre conjunta (Carter B., 1994).

Este modelo 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, la prueba de Entropía y la prueba de Información Conjunta de Incertidumbre (Carter B., 1994).

Como resultado, las variables correlacionadas se deben ignorar o combinar en un tercero que reemplazará el par correlacionado en el modelo; los resultados que se muestran en la Tabla 25 son coeficientes donde el 100% de similitud equivale a 1.



Tabla 25 Correlación de pesos de evidencia para el modelo de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.

Desde	Hacia	Primera variable	Segunda variable	Cramer	Contingencia	Incertidumbre
1	5	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	MDE/layer_0	0.30	0.67	0.26
1	5	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.15	0.42	0.06
1	5	Distancia_desde_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	DistanciaEuclidianaPresa/layer_0	Distancia_desde_Caminos/distance_to_1	0.32	0.58	0.19
1	6	DistanciaEuclidianaPresa/layer_0	MDE/layer_0	0.59	0.80	0.46
1	6	DistanciaEuclidianaPresa/layer_0	Mapa_Pendientes/layer_0	0.29	0.45	0.12
1	6	DistanciaEuclidianaPresa/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.62	0.88	0.74
1	6	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	MDE/layer_0	0.39	0.66	0.31
1	6	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.21	0.35	0.08
1	6	Distancia_desde_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	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	MDE/layer_0	0.39	0.66	0.31
1	7	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.20	0.41	0.07
1	7	Distancia_desde_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	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	MDE/layer_0	0.40	0.66	0.23
3	4	Distancia_desde_Caminos /distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.26	0.41	0.06
3	4	Distancia_desde_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

No hay acuerdo sobre qué umbral debe usarse para excluir una variable (Carter B., 1994), sin embargo, se puede observar que en cada una de las pruebas existe una correlación difusa y ninguna es demasiado alta con respecto a las otras transiciones. Por ejemplo, en la prueba Cramer de la transición 1→6 (distancia euclidiana a la presa con respecto al mapa de uso de suelo inicial).



Se puede tener un porcentaje hasta del 0.62 pero las pruebas de contingencia 0.88, entropía 1.65 y la información conjunta de incertidumbre de 0.74 tienen una correlación baja con respecto al global, por lo que la correlación que tiene el mapa de distancia euclidiana a la presa con respecto al mapa inicial de uso de suelo y vegetación del año 1984 es baja.

Esto quiere decir que no es necesario excluir ninguna transición de la tabla de pesos de evidencia.

5.1.5. Construcción y ejecución del modelo de simulación

Los datos de entrada que se necesitan para generar el modelo de simulación de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal mostrados en la Ilustración 30 se listan en el apartado 5.1.2:

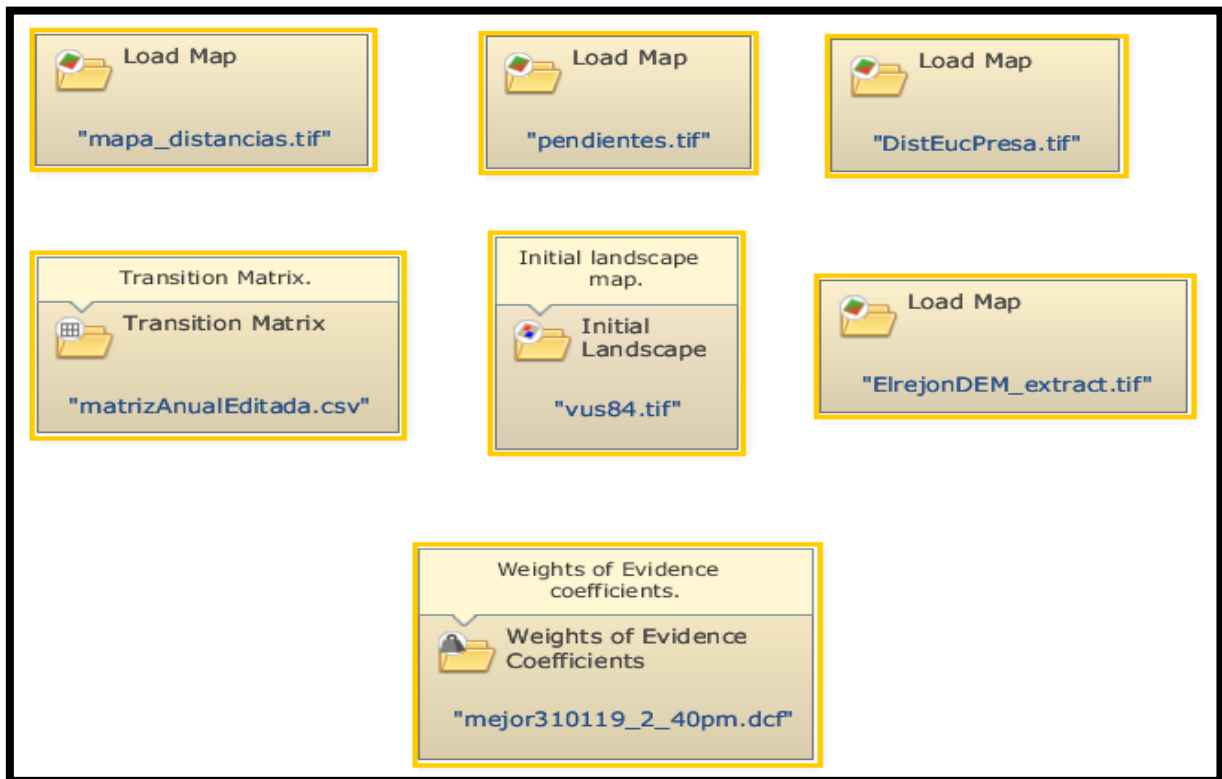


Ilustración 30 Datos de entrada para el modelo de cambio de uso de suelo y vegetación de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.



Además, se agregan los pesos de evidencia que se desarrollaron en el apartado 5.1.3. y la matriz de transición anualizada para 19 pasos de la Tabla 22.

Al correr el modelo de simulación de probabilidad de uso de suelo y cobertura vegetal es necesario observar que éste sea parecido al mapa 2017 de la serie VI de uso de suelo y vegetación, de no ser así es necesario variar gráficamente los pesos de evidencia para suavizar la expansión y creación de nuevos parches.

El resultado de variar los parámetros gráficos de los pesos de evidencia para 14 años a partir del 2003 podría llevar a tener un mapa modelo al año 2017 mostrado en la Ilustración 31.

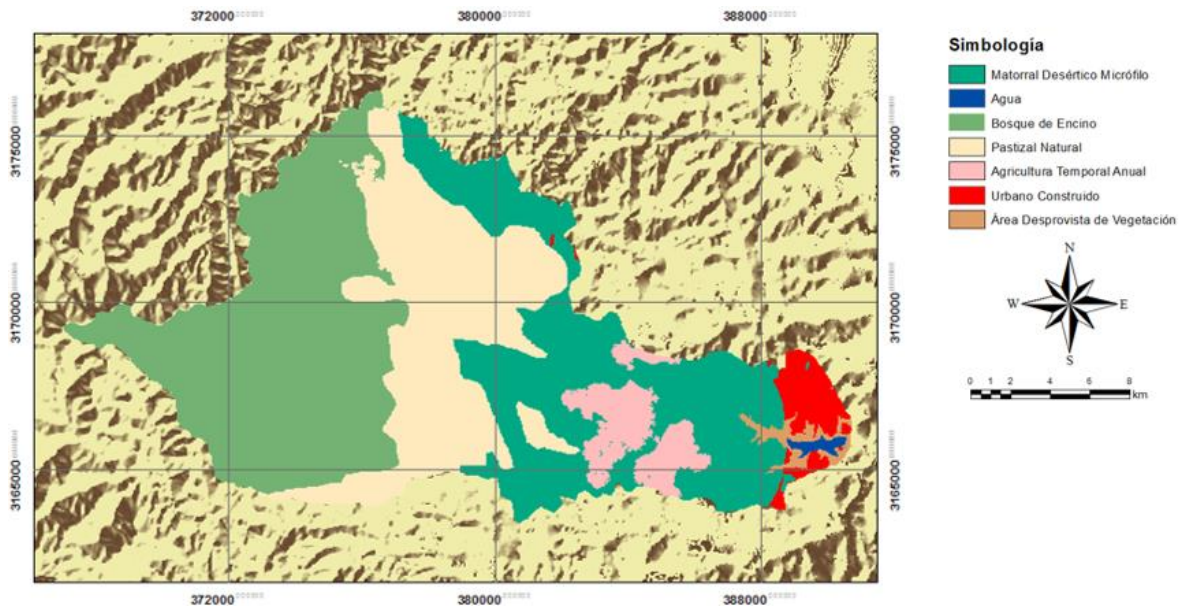


Ilustración 31 Mapa resultado del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal 2017 para la cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.

5.1.6. Validación de la simulación usando una función de decaimiento exponencial

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 espaciales similares y también una concordancia espacial dentro de una cierta celda cambio (Britaldo S., 2009).



En el software DINAMICA EGO se utiliza una modificación al método Hagen (2003) llamado mapa de similitud recíproca que tiene en cuenta la ubicación y la categoría dentro de un vecindario celular (Britaldo S., 2009).

Este método emplea una función de decaimiento exponencial con la distancia para ponderar la distribución de las celdas alrededor de una celda central como se muestra en la Ilustración 32 y en la Ilustración 33.

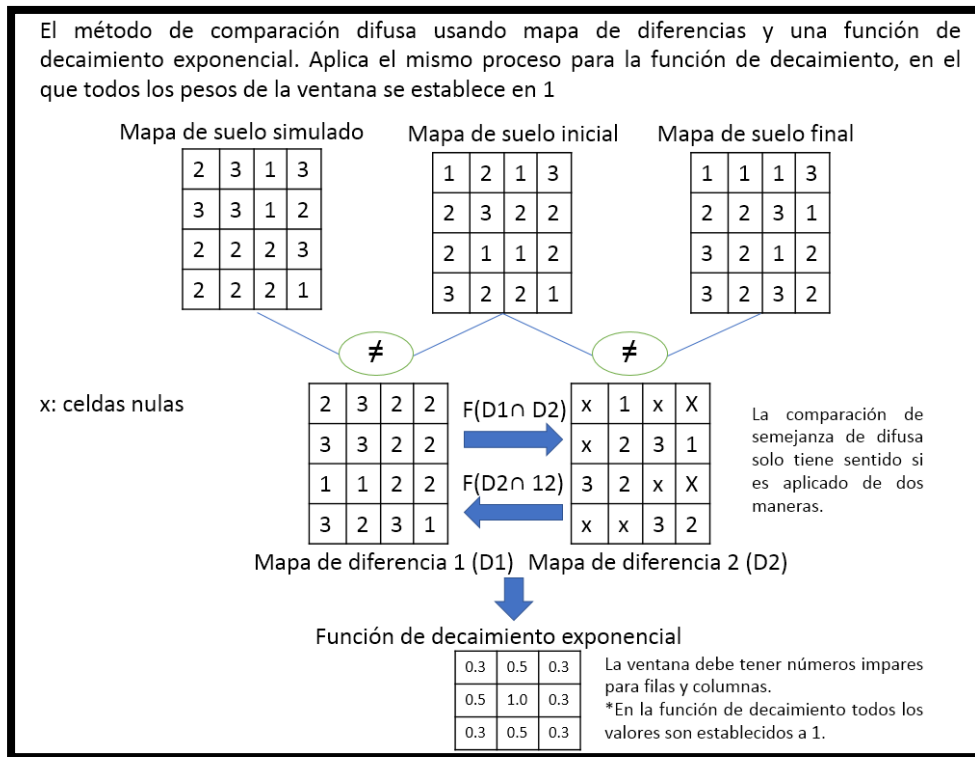


Ilustración 32 Método de comparación difusa utilizando un mapa de diferencias y una función de decaimiento exponencial. El mismo proceso se aplica a la función de disminución constante, en la que todos los pesos de las ventanas se establecen en 1. Fuente tutorial: Construyendo un modelo de simulación de uso de suelo y vegetación. DINAMICA EGO 2013.

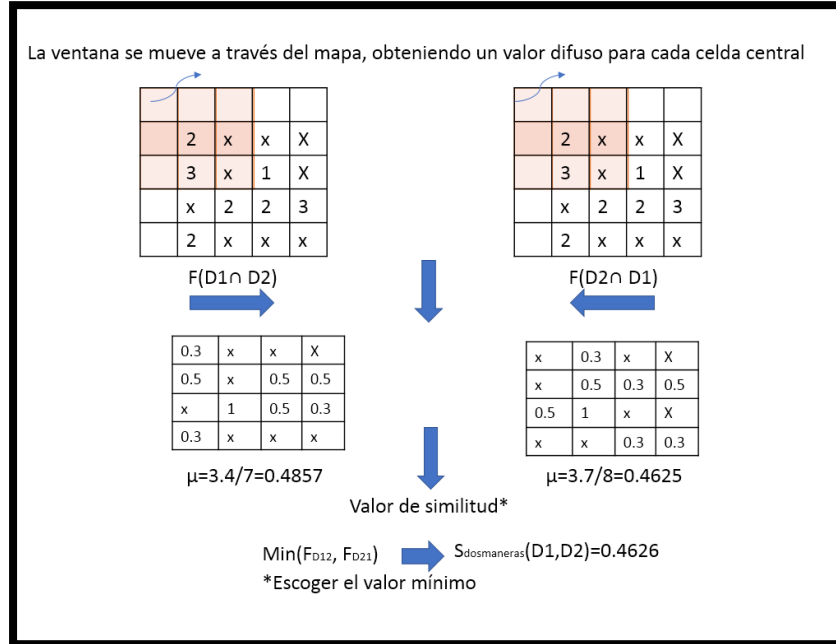


Ilustración 33 Continuación de la Ilustración 31. Fuente: tutorial: Construyendo un modelo de simulación de uso de suelo y vegetación. DINAMICA EGO 2013.

El mapa de similitud mínimo Ilustración 34 corresponde a la similitud obtenida comparando los cambios simulados con los reales. Las áreas rojas muestran un ajuste espacial alto a moderado, mientras que el azul indica un ajuste pobre.

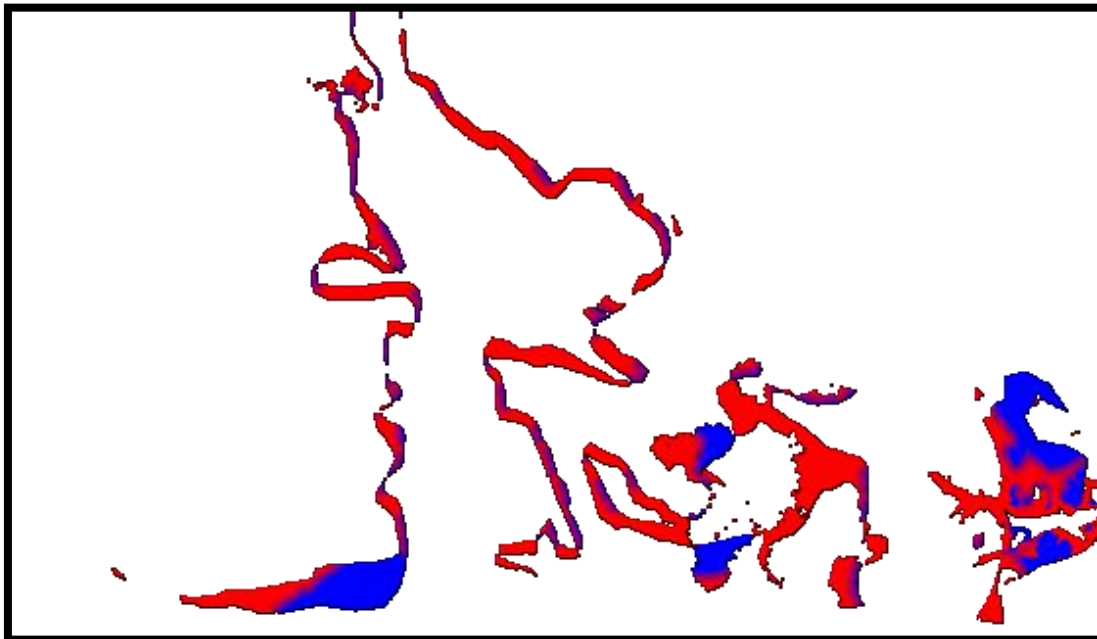


Ilustración 34 Resultado del submodelo de validación gráfica usando una función de decaimiento exponencial. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.



5.1.7. Validación de la simulación usando ventanas múltiples con una función constante

Otra forma de medir la aptitud espacial entre dos mapas es mediante el análisis de similitud de múltiples ventanas.

Este método emplea una función de decaimiento constante dentro de un tamaño de ventana variable. Si se encuentra el mismo número de celdas de cambio dentro de la ventana, el ajuste será 1 sin importar sus ubicaciones (Britaldo S., 2009).

Esto representa una forma conveniente de evaluar la aptitud del modelo mediante la disminución de la resolución espacial. Los modelos que no coinciden bien a alta resolución pueden tener un ajuste apropiado a una resolución más baja.

Para la validación del modelo se usó desde la ventana de 1x1 equivalente al tamaño total del mapa de 23.64 x 12.91 km con un porcentaje de similitud de 16.82% hasta ventanas de 101x101 equivalentes a 1155.77x1155.77 m con un porcentaje máximo de similitud de 81.72%, sin embargo, es necesario observar la Ilustración 35 para determinar hasta qué punto deja de existir un crecimiento agresivo y la tendencia se vuelve constante.

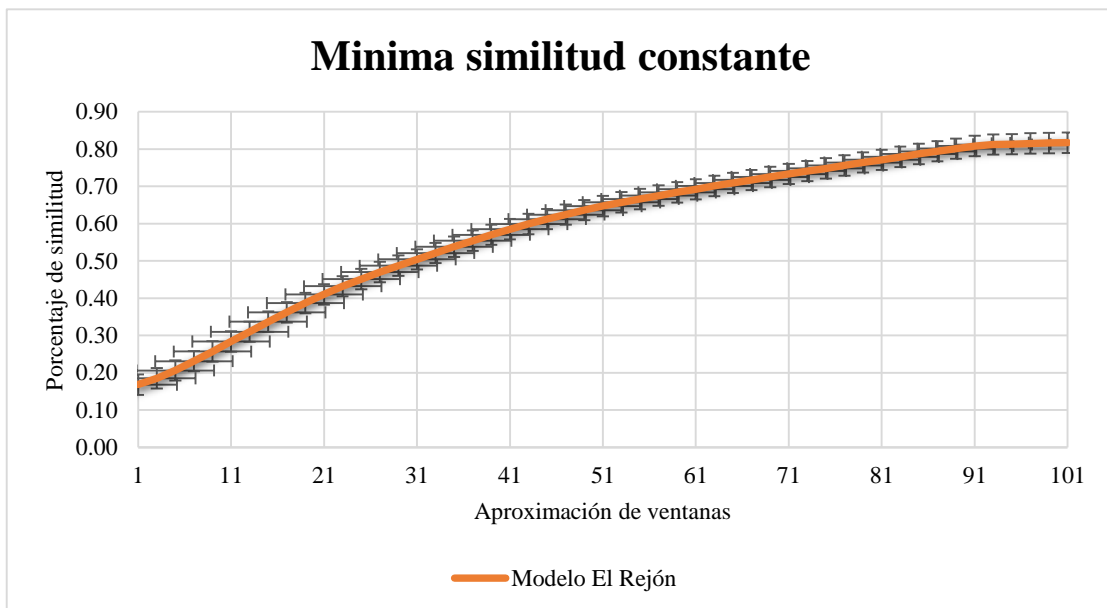


Ilustración 35 Gráfica del resultado de mínima similitud constante del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal del a Cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih. México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.



En la Tabla 26 se muestra el crecimiento de la similitud de todas las ventanas y su diferencia con el inmediato anterior para determinar numéricamente en qué punto el crecimiento ya no es considerable.

Tabla 26 Mínima similitud constante del Modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal del a cuenca El Rejón, Chihuahua, Chih. México. Fuente: Elaboración propia en el software DINAMICA EGO.

Ventanas	Mínima Similitud	Diferencia	Ventanas	Mínima Similitud	Diferencia
1	0.168		51	0.647	0.011
3	0.185	0.016	53	0.657	0.010
5	0.206	0.022	55	0.666	0.009
7	0.231	0.025	57	0.675	0.009
9	0.257	0.026	59	0.684	0.009
11	0.284	0.026	61	0.692	0.009
13	0.310	0.027	63	0.701	0.008
15	0.337	0.027	65	0.709	0.008
17	0.362	0.026	67	0.717	0.008
19	0.387	0.025	69	0.725	0.008
21	0.410	0.023	71	0.733	0.008
23	0.432	0.021	73	0.741	0.008
25	0.451	0.020	75	0.748	0.008
27	0.470	0.018	77	0.756	0.008
29	0.487	0.018	79	0.764	0.008
31	0.504	0.017	81	0.771	0.008
33	0.521	0.017	83	0.779	0.008
35	0.538	0.017	85	0.787	0.008
37	0.554	0.016	87	0.794	0.008
39	0.570	0.015	89	0.801	0.007
41	0.585	0.015	91	0.808	0.007
43	0.599	0.014	93	0.812	0.004
45	0.612	0.013	95	0.813	0.001
47	0.624	0.012	97	0.815	0.001
49	0.636	0.012	99	0.816	0.001
			101	0.817	0.001

Se observa que a partir del tamaño de ventanas de 93x93 la diferencia entre las similitudes empieza a ser constante, por lo que se considera 81% como un valor aceptable del modelo de mínima similitud constante.

5.1.8. Simulación formando parches

DINAMICA EGO utiliza un sistema local de autómatas celulares un motor de transición compuesto por dos funciones de transición complementarias, Expander y Patcher, especialmente diseñadas para reproducir los patrones espaciales de cambio (Britaldo S., 2009).



El primer proceso está dedicado solo a la expansión o contracción de parches anteriores de una determinada clase, mientras que el segundo proceso está diseñado para generar o formar nuevos parches.

Los tamaños de los parches de cambio se establecen de acuerdo con una distribución de probabilidad log-normal. Por lo tanto, es necesario especificar los parámetros de esta distribución representados por la media y la varianza de los tamaños de parche que se formarán.

A continuación, en la Ilustración 36, se muestran los porcentajes de cambio en los parches de expansión y sus parámetros de expansión en hectáreas para cada transición.

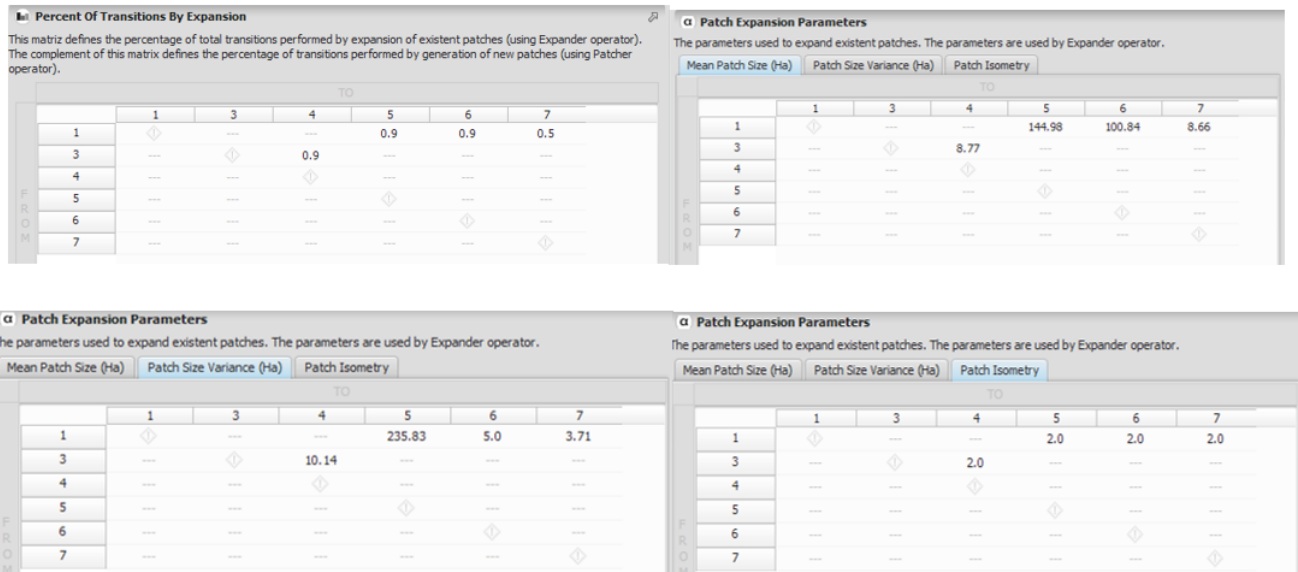


Ilustración 36 Porcentaje de transición para la expansión de parches existentes del modelo de cambio de uso de suelo y vegetación de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.



En la Ilustración 37 se muestran los resultados con respecto a la generación de nuevos parches. Fuente: Elaboración propia en DINAMICA EGO.

FROM \ TO	1	3	4	5	6	7
1	↓	---	---	144.98	31.46	8.66
3	---	↓	8.77	---	---	---
4	---	---	↓	---	---	---
5	---	---	---	↓	---	---
6	---	---	---	---	↓	---
7	---	---	---	---	---	↓

FROM \ TO	1	3	4	5	6	7
1	↓	---	---	235.83	40.0	3.71
3	---	↓	10.14	---	---	---
4	---	---	↓	---	---	---
5	---	---	---	↓	---	---
6	---	---	---	---	↓	---
7	---	---	---	---	---	↓

FROM \ TO	1	3	4	5	6	7
1	↓	---	---	2.0	2.0	2.0
3	---	↓	2.0	---	---	---
4	---	---	↓	---	---	---
5	---	---	---	↓	---	---
6	---	---	---	---	↓	---
7	---	---	---	---	---	↓

Ilustración 37 Parámetros usados para generar nuevos parches en el operador. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.

5.1.9. Simulación con parches y expansión

En la Ilustración 38 se muestra la estructura del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal considerando los resultados de expansión y creación de parches de la Ilustración 36 y la Ilustración 37 de acuerdo con una matriz de transición que especifica las tasas netas y los insumos que definen la geometría del parche.

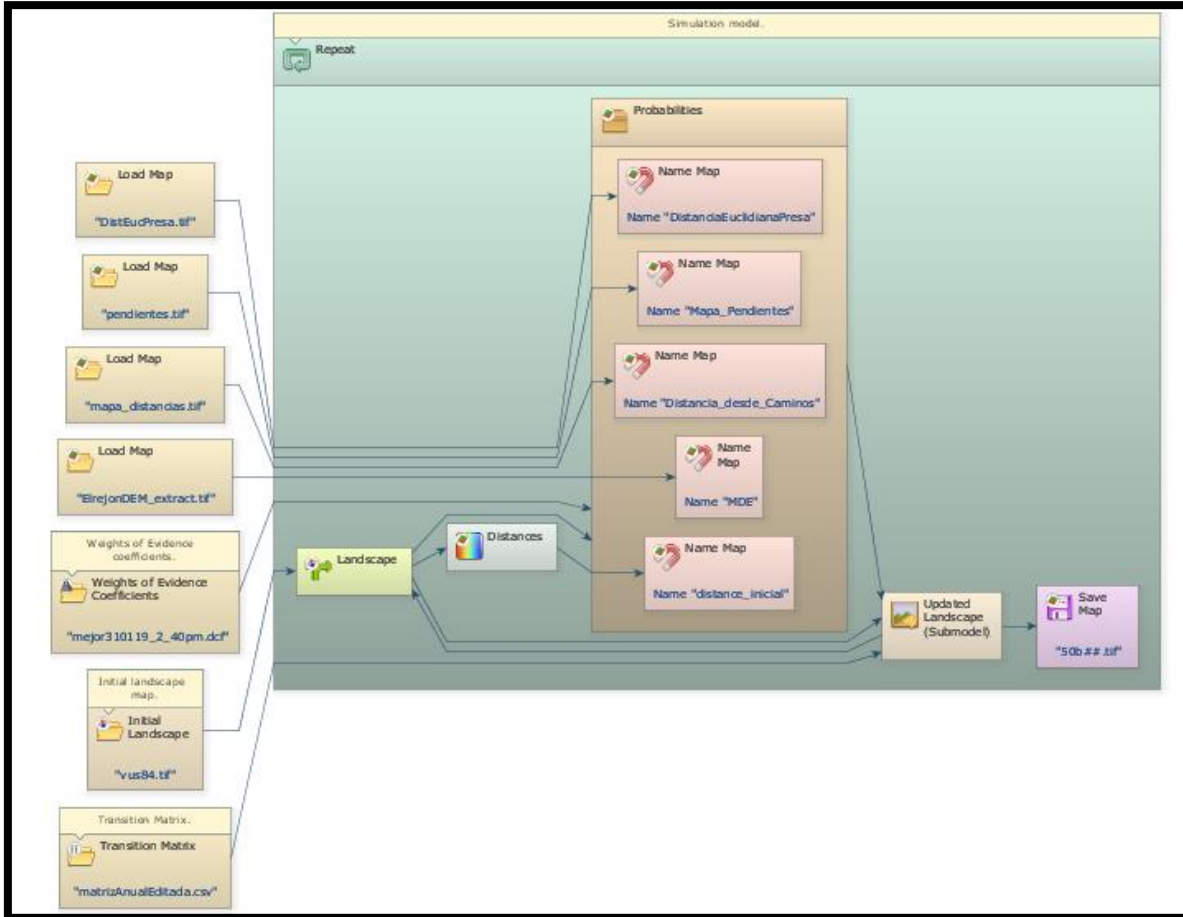


Ilustración 38 Modelo Final con adecuaciones de creación y expansión de parches de la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih. México. Fuente: Elaboración propia con el Software DINAMICA EGO.

Si es necesario en este paso aún se puede calibrar el modelo según su resultado, afectando los datos de expansión y creación de parches, así como la matriz de transición, esto se hace un parámetro a la vez y corriendo el modelo, para observar las afectaciones que se generan. En el modelo del caso de estudio solo fue necesario calibrar gráficamente los pesos de evidencia.



5.1.10. Proyección del mapa

A continuación, se muestra en la Ilustración 39 el mapa final que se generó a 50 años a partir del año 2003, que será utilizado para determinar el coeficiente de escurrimiento de agua en esta investigación. El modelo podría generar mapas año por año hasta llegar a los 100, sin embargo, entre más lejos se encuentre del mapa real más probable es que exista discordancia en su efectividad, es posible que gracias a los resultados de las simulaciones existan reacciones antropológicas de conservación o disminución del cambio negativo que se podría generar en el ecosistema actual.

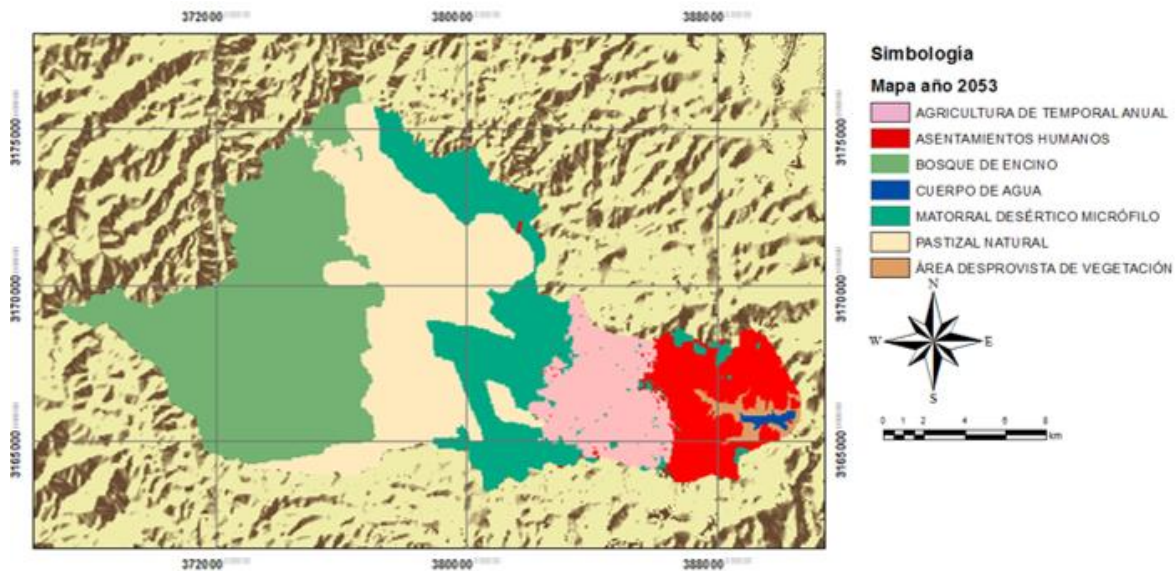


Ilustración 39 Mapa resultado de la modelación de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca presa El Rejón, Chihuahua, Chih., México, año 2053. Fuente: Elaboración propia con el software DINAMICA EGO.

5.2. Índice de precipitación ante el cambio climático

En este apartado se desarrolla la metodología que se usó para adecuar el escenario de cambio climático CMIP5 y el modelo HADGEM2_ES en un índice de anomalías de cambio climático aplicable a las estaciones climatológicas del caso de estudio.



5.2.1. Elección del escenario de cambio climático y modelo de circulación global.

CMIP5 es la fase más reciente del proyecto CMIP (2010-2014). Desde el punto de vista técnico, CMIP5 incluyó más metadatos que las fases anteriores, describiendo las simulaciones de los diferentes modelos.

El escenario CMIP5 es el único modelo de acoplamiento con el que trabaja el sistema del ACDM, y el modelo de circulación global elegido es el HADGEM_ES debido a que su uso para predicciones meteorológicas es a fin al caso de estudio.

Para el caso de estudio se utilizó el forzamiento radiativo RCP8.5 debido a que el gasto máximo de diseño implica casos extremos de lluvias máximas y el horizonte que se adecua es el futuro medio debido a que el año al que se llegó mediante el modelo de autómatas celulares es el 2053.

5.2.2. Selección del modelo CMIP5 en la zona de estudio

La variable utilizada es el porcentaje de cambio de precipitación regionalizada con un modelo de circulación global HADGEM2_ES con forzamiento radiativo RCP8.5 a un horizonte futuro medio 2045-2069 lo que arrojó doce mapas uno por mes que se encuentran en el anexo 1, además en el anexo II se muestra el análisis que se realizó con el porcentaje de cambio de precipitación con respecto al área total que abarcan los píxeles del que depende el análisis.

Con los resultados de cada mes se generó un índice de precipitación ante el cambio climático (IPcc) con respecto al escenario y modelo mencionados, la Tabla 27 resume los resultados obtenidos, que se usaron para modificar los datos de las lluvias máximas anuales de las estaciones climatológicas seleccionadas (presa El Rejón DGE, presa Chihuahua DGE y Observatorio).



Tabla 27 Resumen de los índices de precipitación ante el cambio climático generados con el escenario CMIP5 con un modelo de circulación global HADGEM2_ES con forzamiento radiativo RCP8.5 a un horizonte futuro medio 2045-2069 en la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia por medio del sistema del ACDM.

Mes	IPcc, %
Enero	-67.80
Febrero	-100.00
Marzo	-82.61
Abril	-76.09
Mayo	-46.40
Junio	-2.77
Julio	-8.51
Agosto	4.20
Septiembre	-11.30
Octubre	91.31
Noviembre	-65.17
Diciembre	-26.79

5.3. Estimación actualizada del gasto de diseño

En este apartado se determina el gasto máximo de diseño por medio del modelo lluvia escurrimiento, que usa los mapas de uso de suelo y vegetación generados por el modelo de predicción de autómatas celulares y considera la precipitación máxima anual afectada por el índice de precipitación ante el cambio climático.

5.3.1 Datos de precipitación máxima anual

La información pluviométrica de este estudio corresponde a las estaciones climatológicas convencionales de la Tabla 18 y cuyos datos de precipitación máxima anual se encuentran en la Tabla 28.



Tabla 28 Valores máximos anuales de precipitación para las estaciones climatológicas convencionales que influyen en el caso de estudio. Fuente: CLIMOM, 2019.

Año	Precipitación máxima en 24 horas, mm		
	8114- Presa El Rejón	8185-Presa Chihuahua	8040-Observatorio
1951	*	*	18
1952	*	*	34.7
1953	*	*	11
1954	*	*	70
1955	*	*	48
1956	*	*	30.6
1957	*	*	23.6
1958	*	*	31.5
1959	*	*	24.6
1960	*	*	25.6
1961	*	7.5	20
1962	*	21	23
1963	*	42	62
1964	*	27.5	19
1965	*	52.5	42.5
1966	*	116.5	70
1967	*	34	43
1968	*	73	60.3
1969	55	44	49
1970	36	28	30.5
1971	28.5	58	26.2
1972	30	25.5	34.9
1973	43	56.5	50.5
1974	51	65	51
1975	27	37.5	38
1976	74	93	80.6
1977	77	40	31.8
1978	78	65	67.2
1979	65	73	71.5
1980	63	39.5	51.7
1981	65	50.5	115

Año	Precipitación máxima en 24 horas, mm		
	8114- Presa El Rejón	8185-Presa Chihuahua	8040-Observatorio
1982	38	24.5	30
1983	17	37	27
1984	21.5	45	19.9
1985	40	46	56
1986	55	51	40.5
1987	75.5	69.5	52.2
1988	28	31.5	35
1989	44	50.5	65.9
1990	100	101	80
1991	58.5	61	31.6
1992	36	40.8	44.3
1993	40.8	32.2	28.2
1994	24.3	20	32.2
1995	86.5	88	112.9
1996	77.6	57.7	65.8
1997	32	17.6	23.4
1998	28.9	30.5	30.5
1999	55	40	54
2000	68	39.5	72.6
2001	53.3	63	63.2
2002	20.5	43.6	43.6
2003	48	62.5	62.5
2004	93	92	91.5
2005	57.3	58	59.1
2006	27	28	27
2007	31	30	29.6
2008	59.1	60	59.1
2009	28	29	27.5
2010	58	61	60
2011	39	40	38.8

5.3.2. Aplicación del IPcc

El índice de precipitación ante el cambio climático se aplica como un porcentaje a la precipitación máxima anual de las estaciones climatológicas, de tal manera que dependiendo del mes en el que se presente la precipitación será el índice que se aplique en la ecuación 5.2.

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

5.2



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.

A continuación, en la Tabla 29 se muestran los resultados de aplicar el $IPcc$ a las estaciones climatológicas convencionales del estudio hidrológico de la cuenca El Rejón.



5.3.3. Análisis de homogeneidad e independencia de los datos

Los procesos hidrológicos son, en general, tan complejos que es difícil representarlos en forma determinista. Por ello, es necesario habitualmente estudiarlos como procesos estocásticos (Haan, 1977).

El diseño de obras hidráulicas está relacionado con supuestos eventos hidrológicos extremos, ligados a una probabilidad de ocurrencia, el análisis de homogeneidad e independencia de los datos de las estaciones climatológicas convencionales del estudio se desarrolló con el software Análisis de Frecuencia AFA versión 1.1 (IMTA, 2010).

5.3.3.1. Pruebas de homogeneidad

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, la desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de la homogeneidad o la inconsistencia (Escalante y Reyes, 2002).

Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos parten de una hipótesis nula y usan una regla para aceptarla o rechazarla.

- Prueba estadística de Helmert

Se analiza el signo de las desviaciones de cada evento X_i de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, y de lo contrario se considera como un cambio C.

La serie se considera homogénea si se cumple la ecuación 5. 3.

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1}$$

5. 3

Donde:

n_j = Número de datos.



- Prueba estadística T de Student

Cuando la causa de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico T de Student recomendada para su aplicación (Escalante y Reyes, 2002).

Sea una serie X_i para $i= 1, 2, 3, \dots, n$ la cual se divide en 2 conjuntos de tamaño $n_1=n_2=n/2$, entonces la prueba se define como en la ecuación 5. 4:

$$t_d = \frac{x_1 - x_2}{\left[\left(\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

5. 4

Donde:

$X_1 S_1^2$ son la varianza y la media de la primera parte del registro de tamaño n_1

$X_2 S_2^2$ son la varianza y la media de la primera parte del registro de tamaño n_2

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución “T” de Student de dos colas, con $v=n_1+n_2-2$ grados de libertad y para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Sólo si el valor absoluto de t_d es mayor que el valor de la distribución “T” de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie x_i se considera no homogénea.

- Prueba estadística de CRAMER

Se utiliza para verificar la homogeneidad en el registro x_i de la muestra de datos y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro (Escalante y Reyes, 2002).

Con este propósito se consideran 3 bloques, el primero del tamaño total de la muestra n ; el segundo de tamaño n_{60} (el 60% de los últimos valores de la muestra n) y el tercero del tamaño n_{30} (el 30% de los últimos valores de la muestra n).



La prueba compara el valor de la media del registro total con la media de cada uno de los bloques elegidos x_{60} y x_{30} . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no exista una diferencia significativa entre la media de los bloques (ecuaciones 5. 5).

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

$$S_x = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$x_{60} = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{x_k}{n_{60}}$$

$$x_{30} = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{x_k}{n_{30}}$$

$$\tau_{60}^j = \frac{x_{60} - \bar{x}}{S_x}$$

$$\tau_{30}^j = \frac{x_{30} - \bar{x}}{S_x}$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + \tau_w^j]^2} \right\} |\tau_{30}^j| \text{ estadístico de prueba para } w = 30 \text{ y } w = 6$$

5. 6

El estadístico tiene distribución “T” de Student con dos colas con $v=n_1+n_2-2$ grados de libertad y para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Si y sólo si el valor de t_w , para $w=30$ y $w=60$, es mayor que el correspondiente de la distribución de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto X_i se considera no homogénea.



En la Tabla 30 se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad que arrojó el software AFA v1.1, utilizando los datos de precipitación máxima anual en milímetros para las estaciones climatológicas convencionales 8114- Presa El Rejón, 8185-Presa Chihuahua; y 8040- Observatorio.

Tabla 30 Resultado de cumplimiento de homogeneidad para el estudio hidrológico de la cuenca presa El Rejón, en Chihuahua, Chih., México. Fuente: AFA v1.1, 2010.

Tipo de estación	Clave	Nombre de la estación	Método			
			Helmert	"T" de Student	CRAMER	
					T60	T30
ECC	8114	Presa El Rejón (DGE)	No homogénea	Homogénea	No homogénea	No homogénea
ECC	8185	Presa Chihuahua (DGE)	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Homogénea
ECC	8040	Observatorio	Homogénea	Homogénea	No homogénea	No homogénea

En el resultado se observa que ninguna estación es homogénea según los tres criterios, sin embargo, ya que se manejan parámetros diferentes para el cumplimiento en cada método, cada estación cumple en por lo menos uno, por lo que se acepta que los datos de entrada de todas las estaciones son homogéneos.

5.3.3.2. Independencia de eventos

Para poder realizar el análisis de frecuencias se requiere que la muestra X_i de la serie de datos esté compuesta por variables aleatorias, es decir, los elementos de la muestra deben ser independientes entre sí, para probarlo se puede aplicar la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k para diferentes tiempos de retraso k (Escalante y Reyes, 2002) como se muestra en la ecuación 5. 5.

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})^2}$$

5. 5

Para $r=1$ y $k=1, 2, \dots, n/3$

Los limites al 95% de confianza o el 5% del nivel de significancia. para r_k mostrado en la ecuación 5. 6:



$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n - k - 1}}{n - k}$$

5.6

La gráfica de los valores estimados para r_k contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza se llama correlograma de la muestra. Si solo el 10% de los valores de r_k sobrepasan los límites de confianza, se dice que la serie es independiente (Escalante y Reyes, 2002).

En la Tabla 31 se muestran los resultados de la prueba de independencia por el método Anderson que arrojó el software AFA v1.1 para los datos pluviométricos de las estaciones climatológicas convencionales 8114-Presa El Rejón, 8185-Presa Chihuahua; y 8040-Observatorio.

Tabla 31 Resultados de la prueba de independencia por el método Anderson de los datos pluviométricos de las estaciones climatológicas convencionales de la cuenca presa El Rejón, en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia en AFA v1.1, 2010.

Tipo de estación	Clave	Nombre	Resultados de la prueba
ECC	8114	Presa El Rejón (DGE)	Independiente
ECC	8185	Presa Chihuahua (DGE)	Independiente
ECC	8040	Observatorio	Independiente

5.3.4 Análisis de frecuencias

Para obtener las estimaciones de datos hidrológicos correspondientes a un determinado periodo de retorno (T_r), se hace uso del análisis de frecuencia hidrológico, cuyo objetivo es interpretar el registro pasado de eventos hidrológicos, en términos de probabilidades de ocurrencias futuras (Bobée D., Ashkar B., 1991).

En la Tabla 32 se muestra el resumen del uso del software AFA v1.1, para evaluar cuantitativamente el error estándar de ajuste que existe al analizar la serie de datos de las estaciones climatológicas convencionales de este estudio (ECC-IPcc), con cada función de distribución de probabilidad que soporta dicho software.



Tabla 32 Error estándar de ajuste aplicado a cada una de las estaciones climatológicas convencionales (IPcc) del caso de estudio por función de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración propia en AFA v1.1, 2010.

Función de distribución de probabilidad	Error estándar de ajuste		
	8114.-Presa El Rejón	8185.-Presa Chihuahua	8040.-Observatorio
Distribución exponencial 1 parámetro	19.31	23.16	21.03
Distribución exponencial 2 parámetros	5.20	5.59	5.06
Distribución Gamma 2 parámetros	2.66	2.53	2.35
Distribución Gamma 3 parámetros	2.51	2.59	2.51
Distribución Gumbel	2.96	2.30	2.44
Distribución doble Gumbel	2.66	3.27	3.13
Distribución log normal 2 parámetros	2.85	3.21	3.08
Distribución log normal 3 parámetros	2.61	2.66	2.39
Distribución log Person III	3.94	3.41	3.26
Distribución normal	5.31	4.20	4.32
Distribución de valores extremos	3.55	2.94	2.74
Mínimo error estándar de ajuste	2.51	2.30	2.35

Los resultados de la Tabla 32 mostraron que para los datos de la estación presa El Rejón la función que mejor se ajusta es la distribución Gamma 3 parámetros, para la estación presa Chihuahua la distribución Gumbel y para la estación Observatorio la distribución Gamma 2 parámetros.

Para el presente estudio se utilizaron datos de las estaciones climatológicas convencionales cercanas a la cuenca de la presa El Rejón, de tal manera que se manejaron dos tipos de cálculos, los primeros aplicando el IPcc a los datos de precipitación y los segundos sin él. Esto para observar cómo afecta este índice al modelo de lluvia escurrimiento.

Los resultados del análisis de frecuencias utilizando la mejor función de distribución de probabilidad por estación con y sin el IPcc se muestran en la Tabla 33 y en la Tabla 34. Por medio del análisis de polígonos de Thiessen de la cuenca desarrollado apartado 4.2.9. se determinó la influencia que cada estación climatológica convencional tiene sobre la cuenca de estudio.

Este análisis servirá para realizar los cálculos de las curvas de intensidad duración-periodo de retorno.



Tabla 33 Resultado del análisis de frecuencia de los datos de precipitación máxima anual de las estaciones climatológicas convencionales de la zona de estudio con el IPcc aplicado. Fuente Elaboración propia en AFA v1.1, 2010.

Periodo de retorno, Tr (años)	Precipitación, mm			Precipitación promedio ponderada
	Estación El Rejón	Estación Chihuahua	Estación Observatorio	
	Influencia de la cuenca			
	78.02 %	18.19%	3.79%	1.00
2	43.75	45.31	41.942	43.97
5	65.943	65.655	60.951	65.70
10	80.256	79.124	72.859	79.77
20	93.597	92.045	83.786	92.94
50	110.358	108.769	97.327	109.58
100	122.61	121.301	107.118	121.78
200	134.61	133.788	116.635	133.78
500	150.198	150.262	128.901	149.40
1,000	161.838	162.712	137.999	161.09
2,000	173.38	175.158	146.975	172.70
5,000	188.532	191.608	158.696	187.96
10,000	199.926	204.05	167.468	199.45

Tabla 34 Resultado del análisis de frecuencia de los datos de precipitación máxima anual de las estaciones climatológicas convencionales de la zona de estudio sin el IPcc aplicado. Fuente elaboración propia en análisis de frecuencia AFA v1.1, 2010.

Periodo de retorno, Tr (años)	Precipitación, mm			Precipitación promedio ponderada
	Estación El Rejón	Estación Chihuahua	Estación Observatorio	
	Influencia en la cuenca			
	78.02 %	18.19%	3.79%	1.00
2	50.282	46.167	41.264	49.19
5	70.078	65.272	61.942	68.90
10	81.14	78.239	76.611	80.44
20	90.442	90.863	91.306	90.55
50	100.833	107.52	111.236	102.44
100	107.559	120.285	126.881	110.61
200	113.475	133.29	143.119	118.20
500	120.233	150.947	165.604	127.54
1,000	124.652	164.71	183.451	134.17
2,000	128.554	178.857	202.068	140.49
5,000	133.022	198.201	227.937	148.48
10,000	135.946	213.336	248.486	154.29

5.3.5. Evento de periodo de retorno seleccionado

El periodo de retorno (Tr), se define como el número de años en el que un evento puede ser igualado o excedido, en promedio y a la larga; está estrechamente ligado al riesgo de ocurrencia (Arreguín, s.f.).

Cuando existe riesgo de pérdida de vidas humanas el periodo de diseño debe ser tal que la probabilidad de exceder el evento sea muy pequeña (CONAGUA, 2007).



En México, la CONAGUA ha establecido los periodos de retorno para la estimación de gasto máximo para las diferentes obras hidráulicas Tabla 35.

Para la construcción de la presa El Rejón se usó un periodo de retorno de 10,000 años como se muestra en la Tabla 11 de gastos de diseño del capítulo 4.1.1 .

Tabla 35 Recomendación de periodos de retorno para la estimación del gasto máximo de diseño en las obras hidráulicas. Fuente: CONAGUA, 1999.

Categoría	Almacenamiento Mm ³	Altura m	Pérdida de vidas	Daños materiales	Creciente de diseño
Pequeña	Menor de 1.5	Menor de 15	Ninguna	Menor que el costo de la presa	Basada en estudios de probabilidad Tr= 500 años
			Moderada	Del orden del costo de la presa	Basada en estudios de probabilidad Tr= 1000 años
			Considerable	Mayor que el costo de la presa	Basada en estudios de probabilidad Tr= 10,000 años
Mediana	Entre 1.5 y 60	Entre 12 y 30	Ninguna	Centro de la capacidad financiera	Estudios de probabilidad Tr= 1,000 a 10,000 años
			Moderada	Ligeramente mayor que la capacidad financiera	Estudios de probabilidad Tr= 10,000 años
			Considerable	Mayor que la capacidad financiera	Tormentas severas. Tormentas maximizadas. Transposición de tormentas: Tr>= 10,000 años
Mayor: No se toleran fallas	Mayor de 60	Mayor de 18	Considerable	Excesivos o como norma política establecida	Máxima posible con base en análisis hidrometeorológicos. Análisis de maximización de tormentas locales y transposición de tormentas con Tr>=10,000 años

5.3.6. Modelo lluvia escurrimiento

La posibilidad de contar con modelos que reproduzcan el comportamiento de las cuencas hidrográficas ayuda a resolver diversos problemas, entre los más comunes: el dimensionamiento de obras hidráulicas, determinación de las afectaciones de inundaciones y la reconstrucción y generación de series de datos (Rodríguez Y., 2010).

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca.
2. Altura total de precipitación.
3. Características generales o promedio de la cuenca y su distribución espacial (forma, pendiente, vegetación, etc.)
4. Distribución temporal de la lluvia.
5. Distribución espacial de la lluvia.



5.3.6.1. Número de escurrimiento

El método del número de curva o “NC” desarrollado por los hidrólogos del U.S. Soil Conservation Service (Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos de América) se usa para determinar el volumen de escurrimiento de una tormenta en una cuenca.

Este coeficiente se determina dependiendo del uso de suelo y vegetación existente en la cuenca de análisis, la descripción de los tipos de suelos y vegetación de la zona de estudio se encuentran en el capítulo 4.2.4.

Los rangos de valores para el número de curva son de 0 (superficie más permeable) a 100 (superficie impermeable).

Para el cálculo del valor de NC, es necesario clasificar el tipo de suelo en cuatro grupos hidrológicos que se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36 Agrupación de tipo de suelo y su influencia en el escurrimiento para el uso del número de curva. Fuente: Estrada G., 2008.

Grupo	Tipo de suelo	Infiltración mínima (mm/h)
A	Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezcla de ambas muy permeables.	11.43-7.62
B	Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.	7.62-3.81
C	Comprende arenas muy finas, arcilla de baja plasticidad, mezclas de arenas, limo y arcilla.	3.81-1.27
D	Incluye principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos pocos profundos con sub-horizontes casi impermeables cerca de la superficie.	1.27-0.00

Después de hacer la clasificación por el tipo de suelo es necesario considerar el uso de suelo y vegetación de la Tabla 37.



Tabla 37 Selección del número de escurrimiento. Fuente: Estrada G., 2008

Uso de la tierra o cobertura	Condición de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Bosques sembrados y cultivados	Ralo, baja transpiración	45	56	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	66	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso, alta transpiración	26	52	62	69
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
	Sucos rectos	70	80	87	90
Cultivos de surco	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
	Sucos rectos	64	76	84	88
Cereales	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
	Sucos rectos	62	75	83	87
Leguminosas (sembradas con maquinaria o al volteo) o potrero de rotación	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
	Sucos rectos	59	74	82	86
Granjas	Pobre	68	79	86	89
Pastizal	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	80
	Curvas de nivel, bueno	6	36	70	79
Potrero (permanente)	Normal	30	58	71	78
Calles y caminos	Pavimentados con banquetas y drenaje de aguas pluviales	98	98	98	98
	De grava	76	85	89	91
	De terracerías	72	82	87	89
	Pavimentados con cunetas	83	89	92	93
Zonas urbanas	Áreas comerciales y de negocios (85%)*	89	92	94	95
	Lotes de estacionamiento pavimentados, techados, entradas de autos, etc.	98	98	98	98
	Zonas industriales (72%)*	81	88	91	93
Rancherías, pueblos y zonas urbanas (65%) con lotes de 500 m ² o menos		77	85	90	92
Residencial	Tamaño promedio del lote:				
	1000 m ² (38%)*	61	75	83	87
	1300 m ² (30%)*	57	72	81	86
	2000 m ² (25%)*	54	70	80	85
	4000 m ² (20%)*	51	68	79	84
Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación establecida). Césped, espacios abiertos, parques, panteones, campos de golf, etc.	8000 m ² (12%)*	46	65	77	82
	Buena condición, 75% del área o más cubierta de pasto	39	61	74	80
	Condición regular, 50 a 75% del área cubierta de pasto	49	69	79	84
Áreas urbanas en desarrollo (vegetación no establecida)	Mala condición, menos del 50% del área cubierta de pasto	68	79	86	89
		77	86	91	94

* Porcentaje promedio de impermeabilidad considerado.



La Tabla 38 y en Tabla 39 muestran los resultados del análisis del número de curva para los mapas de uso de suelo y vegetación del año 2017 INEGI serie VI (Ilustración 16) y del año 2053 resultado de la modelación con autómatas celulares (Ilustración 39).

El número de curva para el mapa 2017 es de 78.79, mientras que el número de curva para el mapa 2053 es de 80.86.

Tabla 38 Desarrollo del cálculo del número de curva para el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2017 (INEGI Serie VI). Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo o cobertura vegetal	Área	Tipo	Número de curva	A*NC
Agua con fondo de matorral desértico microfilo	0.003	B	69	0.001
	0.571	C	79	0.301
	0.007	D	84	0.004
Agricultura temporal	0.482	B	80	0.257
	11.379	C	87	6.613
	0.225	D	76	0.114
Bosque de encino	57.900	D	76	29.397
Desprovisto de vegetación	0.044	B	82	0.024
	0.001	C	89	0.001
	0.276	D	89	0.164
Matorral desértico microfilo	5.556	B	60	2.227
	21.002	C	70	9.821
	11.564	D	76	5.871
Pastizal inducido	13.826	C	86	7.944
	23.004	D	89	13.677
Urbano construido	0.679	B	86	0.390
	0.220	C	91	0.134
	2.952	D	94	1.854
Total				78.795

Tabla 39 Desarrollo del cálculo del número de curva para el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2053 con autómatas celulares. Fuente: Elaboración propia.

Uso de suelo o cobertura vegetal	Área	Tipo	Número de curva	A*NC
Agricultura temporal	0.818	B	80	0.437
	12.299	C	87	7.148
	1.315	D	90	0.791
Agua, con fondo de matorral desértico microfilo	0.551	B	69	0.254
	0.004	C	79	0.002
	0.026	D	84	0.014
Bosque de encino	53.643	D	76	27.235
Desprovisto de vegetación	0.715	B	82	0.392
	0.084	C	89	0.050
	1.000	D	89	0.595
Matorral desértico microfilo	0.101	B	60	0.040
	19.827	C	70	9.272
	6.056	D	76	3.075
Pastizal inducido	13.401	C	86	7.699
	26.164	D	89	15.556
Urbano construido	5.174	B	86	2.972
	0.908	C	91	0.552
	7.606	D	94	4.776
Total				80.860



5.3.6.2. Tiempo de concentración

Es tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Aparicio F. 1989).

Para la solución de este tema se utilizó la expresión propuesta por Kirpich de la ecuación 5.

7:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

5. 7

Donde:

t_c = Tiempo de concentración, horas.

S= Pendiente del cauce principal, adimensional

L=Longitud del cauce principal, metros

Tanto la longitud (26,060 m.) como la pendiente (0.0216) del cauce principal se calcularon en los subcapítulos 4.2.6. y 4.2.7 de este trabajo respectivamente. Por consiguiente, el tiempo de concentración de la cuenca de estudio es de 3.57 horas o 214.42 minutos.

5.3.6.2. Curvas intensidad duración-periodo de retorno (IDT)

Para desarrollar las curvas de intensidad duración-periodo de retorno por el método de Cheng Lung Chen es necesario utilizar los resultados del análisis de frecuencia (Tabla 33 y Tabla 34) en específico los datos de altura de lluvia ponderada para los periodos de retorno de 10 y 100 años.

A continuación, se describe la ecuación de Cheng Lung Chen 5. 8 que se utiliza para determinar las curvas IDT para los periodos de retorno seleccionados.



$$I_d^T = \left\{ \frac{a I_1^{10} \left\{ 10^{2-x} \left[\text{Ln} \frac{Tr}{Tr-1} \right]^{-(x-1)} \right\}}{(d+b)^c} \right\}$$

5. 8

Donde:

I_d^{Tr} = Intensidad de lluvia de T años y d en minutos, en milímetros por hora.

I_1^{10} = Intensidad de lluvia de 10 años y 1 hora de lluvia, en milímetros por hora. Obtenido del mapa de isoyetas de intensidad Ilustración 40.

Tr = Periodo de retorno, en años

D = Duración, en minutos

$R = P_1^{Tr} / P_{24}^{Tr} \rightarrow F = P_{24}^{100} / P_{24}^{10}$

*Nota= Las precipitaciones máximas diarias se multiplican por 1.13 que es un factor de observación si es que en la zona de estudio amanece lloviendo y las mediciones son a las 8:00 am

Se calculan los valores a, b y c de las ecuaciones 5. 9

Cuando $0.10 \leq R \leq 0.60$:

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4$$

Cuando $0.20 \leq R \leq 0.70$

$$a = 21.03453 - 186.463R + 825.4915R^2 - 1084.846R^3 + 524.06R^4$$

$$b = 3.487776 - 68.13076R + 389.4625R^2 - 612.4041R^3 + 315.8721R^4$$

$$c = 0.2677553 + 0.9481759R + 2.109415R^2 - 4.827012R^3 + 2.459584R^4$$

5. 9

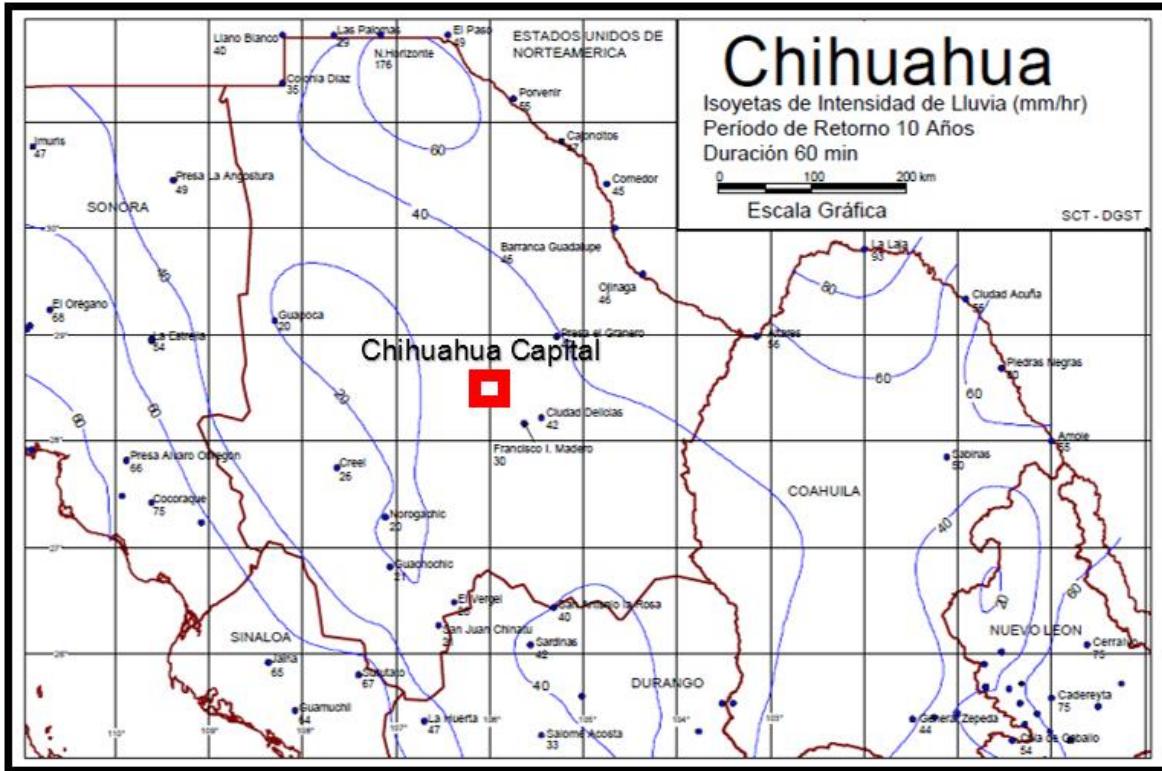


Ilustración 40 Mapa de isoyetas de intensidad de lluvia (mm/hr) para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 60 minutos para el estado de Chihuahua, Chih., México. Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT, 2000.

- ECC-IPcc

En la Tabla 40 y en la Ilustración 41 se muestran las intensidades de lluvia de las estaciones climatológicas convencionales adicionando el índice de precipitación ante el cambio climático.

Tabla 40 Cálculo de intensidades ECC-IPcc por el método de Chen para la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.

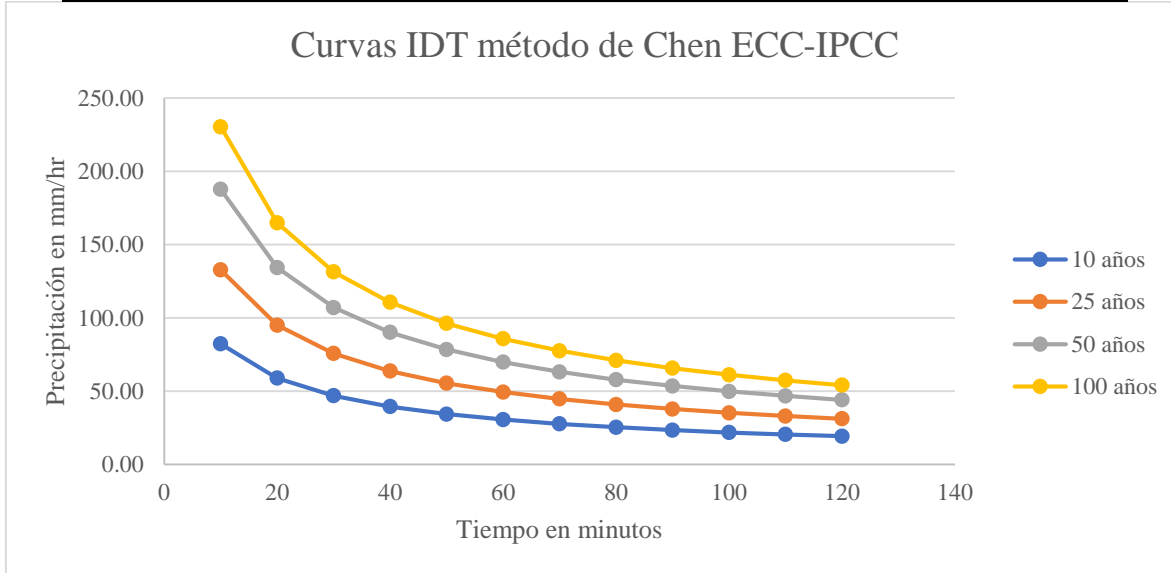
Precipitación máxima diaria		*Fac. Obs.	Intensidad		R	Rprom	F	Para 0.1<R<0.6	
Tr	mm		Tr	mm/hr				a	b
10	79.77	90.14	10	30	0.33	0.38	20.67		
25	92.94	105.03	25	40	0.40	0.40	6.79		
50	109.58	123.82	50	50	0.40	0.38	0.72		
100	121.78	137.62	100	55	1.53				

Tr, años	Intensidad de lluvia en mm/hr											
	Duración, minutos											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	82.30	58.90	46.94	39.52	34.40	30.63	27.72	25.39	23.48	21.89	20.53	19.36
25	132.73	95.00	75.70	63.73	55.48	49.40	44.70	40.95	37.87	35.30	33.11	31.22
50	187.66	134.31	107.03	90.10	78.44	69.84	63.20	57.90	53.55	49.91	46.81	44.14
100	230.35	164.87	131.38	110.60	96.28	85.73	77.58	71.07	65.73	61.26	57.46	54.18



Ilustración 41 Curvas IDT para las ECC-IPcc de la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Intensidad de lluvia en mm/hr											
	Duración, minutos											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	82.56	59.14	47.05	39.54	34.35	30.53	27.58	25.22	23.29	21.68	20.31	19.12
25	126.51	90.61	72.10	60.58	52.63	46.78	42.26	38.65	35.69	33.22	31.12	29.31
50	173.67	124.39	98.98	83.16	72.25	64.21	58.01	53.06	49.00	45.61	42.72	40.23
100	208.12	149.07	118.61	99.66	86.59	76.95	69.52	63.58	58.72	54.65	51.19	48.21



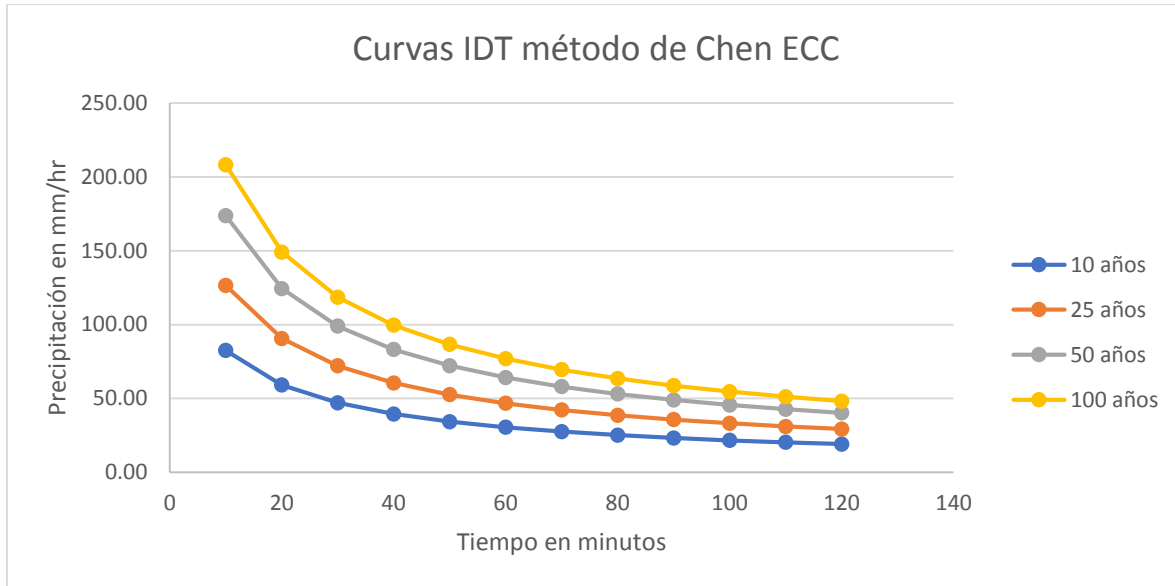
- ECC Normales

En la Tabla 41 se muestran las Intensidades de lluvia de las estaciones climatológicas convencionales sin afectaciones ante el cambio climático y en la Ilustración 42 se muestran las curvas IDT.

Tabla 41 Cálculo de intensidades ECC sin efectos del cambio climático por el método de Chen para la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.

Precipitación máxima diaria			*Fac. Obs.	Intensidad		R	Rprom	F	Para 0.1<R<0.6	
Tr	mm			Tr	mm/hr				a	b
10	80.44		1.13	10	30	0.33	0.40	1.38	22.40	7.38
25	90.55		102.32	25	40	0.39				
50	102.44		115.76	50	50	0.43				
100	110.61		124.99	100	55	0.44				

Ilustración 42 Curvas IDT para las ECC sin afectaciones de cambio climático para la cuenca El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.



5.3.7. Gasto máximo de diseño para obras hidráulicas

Es común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de esta y la precipitación (Aparicio F., 1989).

Existen métodos de estimación del gasto máximo de diseño en cuencas que dependen del uso y precisión que se necesite en los resultados, los métodos que se muestran a continuación se adaptan mejor al medio mexicano y consideran el número de curva de la Asociación de Conservación de Suelo de EEUU que se calculó en el subcapítulo 5.3.6.1.

5.3.7.1. Método CHOW

El método de Ven Te Chow se deriva del método del hidrograma unitario que no usa mediciones hidrométricas a la salida de la cuenca, solo usa datos de características generales de la misma, por lo que se le llama hidrograma sintético y permite conocer el gasto máximo para un determinado periodo de retorno (Aparicio F., 1989).



Su expresión simplificada se formula como en la ecuación 5. 10:

$$Q = AXYZ$$

5. 10

Donde:

Q=Gasto del pico del hidrograma del escurrimiento directo en m³/s

A=Área de la cuenca en km² (Subcapítulo 4.2.5)

X=Factor de escurrimiento, igual al coeficiente de la lluvia en exceso para el periodo de retorno de diseño entre su duración correspondiente en mm/hr

Y=Factor climático, con valor constante de 0.278, debido a que no se utiliza estación pluviométrica base dentro de la zona de estudio, sino que se construyen curvas IDT.

Z= Factor de reducción de pico. (Adimensional)

El factor de reducción depende de la duración y del tiempo pico como se muestra en las ecuaciones 5. 11:

$$Z = 0.00245 + 0.75922 \left(\frac{d}{tp} \right); \text{Para valores de } 0 < \frac{d}{tp} \leq 0.5$$

$$Z = 0.08741 + 0.58929 \left(\frac{d}{tp} \right); \text{Para valores de } 0.5 < \frac{d}{tp} \leq 1$$

$$Z = 0.3534 + 0.3233 \left(\frac{d}{tp} \right); \text{Para valores de } 1 < \frac{d}{tp} \leq 2$$

$$Z = 1; \text{Para valores de } \frac{d}{tp} > 2$$

$$tp = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$$

5. 11

Donde:

d= Duración en horas

tp=Tiempo pico (fórmula V.T. Chow, el tiempo pico es la duración que tarda la precipitación en llegar a su máximo y que exactamente después del él empieza a decrecer).

L=Longitud total del cauce principal en metros (subcapítulo 4.2.6)

S=Pendiente del cauce principal en porcentaje (subcapítulo 4.2.7)

El método de Chow toma en cuenta diversos factores que afectan el escurrimiento, los cuales pueden dividirse en dos grupos, el primero que afecta directamente a la cantidad de lluvia en exceso o escurrimiento directo, el cual consiste principalmente en el uso de la tierra, condición de la superficie, tipo de suelo y la cantidad y duración de la lluvia y el segundo grupo afecta la distribución del escurrimiento e incluye el tamaño y la forma de la cuenca,



la pendiente del terreno y el efecto de retención de flujo por medio del tiempo de retraso (Estrada G., 2008).

Para considerar el primer grupo se cuenta con el cálculo del número de escurrimiento (subcapítulo 4.3.6.1), y es necesario calcular la precipitación en exceso (Pe) para un tirante de lluvia mostrado en la ecuación 5. 12:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

5. 12

Donde:

Pe= Altura de la precipitación en exceso, en mm.

N=Número de escurrimiento (SCS)

P=Precipitación en mm

En el anexo III se encuentran los cálculos realizados y en la Tabla 42 se muestran los gastos máximos para distintos periodos de retorno por el método de Chow.

Tabla 42 Gasto máximo de diseño para los mapas de 2017 y 2053 para diferentes periodos de retorno con y sin el IPcc para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, m ³ /s			
	2017-IPcc	2017	2053-IPcc	2053
10	106.47	100.91	123.51	117.47
25	162.14	138.25	183.36	157.79
50	207.28	168.00	231.30	189.62
100	254.65	199.01	281.22	222.57
1,000	424.74	309.88	458.66	339.29
10,000	608.38	429.97	647.77	464.07

5.3.7.2. Método del hidrograma unitario triangular

En este método el caudal se calcula dependiendo del tamaño de la cuenca (Aparicio F. 1989), en este caso la cuenca se clasifica como pequeña (Tabla 13), por lo tanto, se usan las expresiones 5. 13



$$Q_p = \frac{0.208AP_e}{t_p}$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c$$

5. 13

Donde:

Q_p =Gasto máximo, en m^3/s .

A = Área de la cuenca, en km^2

P_e =Precipitación en exceso, en mm (ecuación 5. 12)

t_p = Tiempo pico, en horas

t_c =Tiempo de concentración, en horas (subcapítulo 4.3.6.2.)

Además, es necesario calcular el tiempo base con las ecuaciones 5. 14 y la duración en exceso para graficar los resultados:

$$t_b = 2.67t_p$$

$$d_e = 2\sqrt{t_c}$$

5. 14

Donde:

t_b = Tiempo base, en horas

t_p = Tiempo pico, en horas

d_e = Duración en exceso, en horas

t_c = Tiempo de concentración, en horas

En el anexo IV se muestran los resultados de los gastos máximos de diseño para los años 2017 y 2053 por el método del hidrograma unitario triangular (HUT) con y sin el IPcc.

En la Tabla 43 se muestra el resumen de los gastos máximos de diseño por el método del hidrograma unitario triangular.

Tabla 43 Resumen del cálculo del gasto máxima de diseño por el método del HUT. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, m^3/s			
	2017-IPcc	2017	2053-IPcc	2053
10	79.48	61.42	93.99	74.03
25	124.58	87.47	142.99	102.74
50	161.60	108.70	182.67	125.84
100	200.88	130.93	224.39	149.83
1,000	343.12	212.40	373.50	236.58
10,000	498.08	302.11	533.82	330.76



5.3.7.3. Método racional

La fórmula racional es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia escurrimiento. Su origen se remonta a 1889. Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura e intensidad de la precipitación (Aparicio F., 1989).

Este método está basado en cartas hipótesis que considera que la intensidad de precipitación es constante en toda la cuenca, consideración que es correcta cuando se trata de cuencas pequeñas, pero difícilmente se cumple en cuencas grandes (Estrada G., 2008).

Se considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración t_c simplificado en las expresiones 5. 15.

$$Q = 0.278CIA$$

$$C = \frac{P_e}{P}$$

5. 15

Donde:

Q=Gasto máximo, en m^3/s

C=Coeficiente de escurrimiento, adimensional

I=Intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración, en mm/hr

A=Área de la cuenca, en km^2

P=Precipitación, en mm

P_e =Precipitación efectiva, en mm

En el anexo V, se muestran los resultados del cálculo de gasto máximo de diseño por el método racional para distintos periodos de retorno para los años 2017 y 2053 considerando el IPcc y sin él.

En la Tabla 44 se resumen los resultados del cálculo del gasto máximo de diseño por el método racional para distintos periodos de retorno en los años 2017 y 2053 para el caso de estudio.



Tabla 44 Resumen del cálculo del gasto máxima de diseño por el método racional. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, m ³ /s			
	2017-IPcc	2017	2053-IPcc	2053
10	178.96	180.46	215.72	217.53
25	256.94	250.33	301.79	294.03
50	342.14	319.87	396.09	370.31
100	420.29	381.71	480.96	436.81
1,000	707.89	589.57	788.48	656.69
10,000	1026.77	794.30	1124.12	869.61



Capítulo VI: Resultados

6.1. Selección del método de estimación del gasto máximo de diseño

Para elegir el método de estimación de gasto de diseño que mejor se adecúa a la presa El Rejón es necesario revisar la Tabla 11 en el capítulo 4.1.1, la cual indica que la obra hidráulica se construyó para una avenida de diseño de 800 m³/s en un periodo de retorno de 10,000 años.

Es necesario comparar los resultados de la estimación del gasto máximo de diseño para la precipitación histórica y las características actuales de la cuenca. En la Tabla 45 se muestra que para el método racional asociado a un periodo de retorno de 10,000 años el gasto máximo de diseño calculado es de 794.30 m³/s, el cual es el más cercano a los 800 m³/s de la avenida de diseño de la presa El Rejón por lo que será este el método el elegido.

Tabla 45 Resumen de la estimación del gasto máximo de diseño 2017 para la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, 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

6.2. Efecto del cálculo del gasto máximo de diseño utilizando el modelo de predicción de autómatas celulares

El cálculo por el método racional del gasto máximo de diseño utilizando el modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal se muestra en la Tabla 46. Esta comparación nos indica que, si las características de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca en el año 2053 son similares a las desarrolladas con el mapa de predicción elaborado en este trabajo, el gasto máximo de diseño asociado a un periodo de retorno de 10,000 años se podría incrementar 75.31 m³/s (9.48%) con respecto al calculado con el mapa de uso de suelo y vegetación al año 2017 (real).



Tabla 46 Comparación del gasto máximo de diseño por el método racional calculado con ayuda del modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, m ³ /s			Porcentaje, %
	2017	2053	Diferencia	
10	180.46	217.53	37.07	20.54
25	250.33	294.03	43.7	17.46
50	319.87	370.31	50.44	15.77
100	381.71	436.81	55.1	14.44
1,000	589.57	656.69	67.12	11.38
10,000	794.3	869.61	75.31	9.48

6.3. Efecto del cálculo del gasto máximo de diseño utilizando IPcc

La comparación de la estimación del gasto máximo de diseño utilizando el índice de precipitación ante el cambio climático (Tabla 47), respecto al mismo cálculo sin efecto del IPcc asociado a un periodo de retorno de 10,000 años arroja una diferencia de 232.47 m³/s (29.27%).

Tabla 47 Comparación del gasto máximo de diseño por el método racional calculado con índice de precipitación ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, m ³ /s			Diferencia, %
	2017	2017-IPcc	Diferencia	
10	180.46	178.96	-1.5	-0.83
25	250.33	256.94	6.61	2.64
50	319.87	342.14	22.27	6.96
100	381.71	420.29	38.58	10.11
1,000	589.57	707.89	118.32	20.07
10,000	794.3	1026.77	232.47	29.27

6.4. Efecto del cálculo del gasto máximo de diseño utilizando el modelo de predicción y el IPcc

En la Tabla 48 se muestra la comparación de las condiciones más desfavorables, considerando que el uso de suelo y la vegetación en el año 2053 se comporte como el mapa de predicción elaborado y además tomando en cuenta el efecto del cambio climático en la región. La diferencia en el resultado asociado a un periodo de retorno de 10,000 años es del orden de los 329.82 m³/s (41.52%).



Tabla 48 Comparación del gasto máximo de diseño por el método racional calculado el modelo de predicción de uso de suelo y cobertura vegetal y con índice de precipitación ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Tr, años	Gasto máximo de diseño, m3/s			Diferencia, %
	2017	2053-IPcc	Diferencia	
10	180.46	215.72	35.26	19.54
25	250.33	301.79	51.46	20.56
50	319.87	396.09	76.22	23.83
100	381.71	480.96	99.25	26.00
1,000	589.57	788.48	198.91	33.74
10,000	794.3	1124.12	329.82	41.52

6.5. Comparación con el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México

En el contexto del Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático (apartado 1.6.), Chihuahua capital tiene un índice de vulnerabilidad social muy bajo como se muestra en la Ilustración 43.

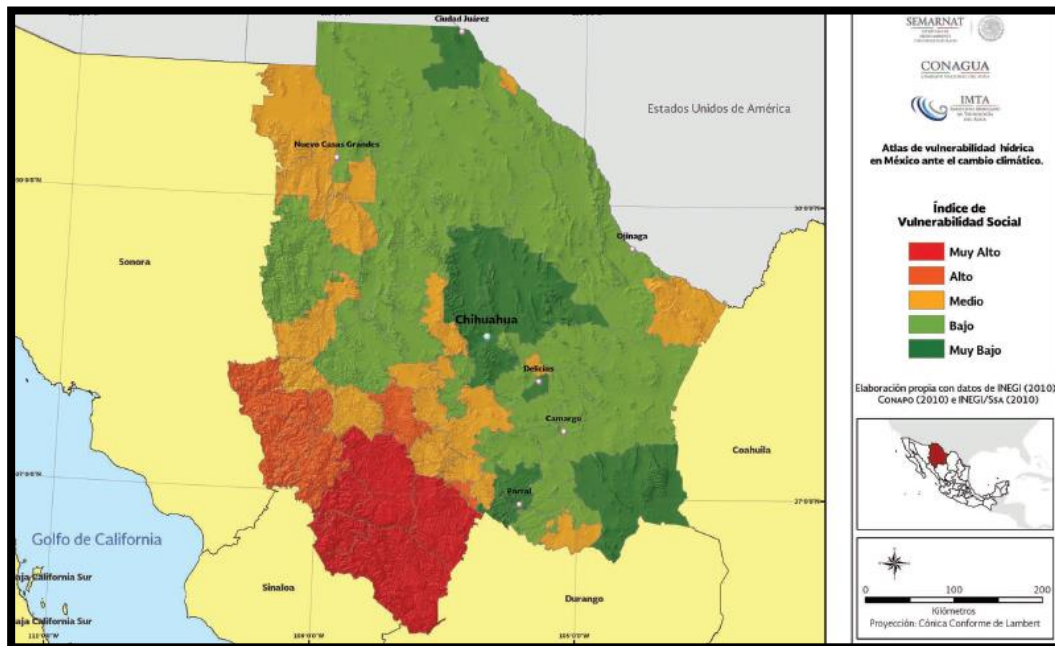


Ilustración 43 Índice de vulnerabilidad social en Chihuahua, Chih., México. Fuente: Atlas de Vulnerabilidad ante el cambio climático, 2015.

El Atlas de Vulnerabilidad Hídrica tiene proyecciones de cambio en la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el estado de Chihuahua bajo los 3 escenarios de radiación (RCP 4.5, 6.0 y 8.5) para el futuro lejano (2075-2099) como se muestra en la Tabla 49, en general es una disminución en la precipitación.



Tabla 49 Proyecciones de cambio de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el estado de Chihuahua.
Fuente: Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático, 2015.

Proyección	Primavera-Verano			Otoño-Invierno		
	RCP4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Precipitación, %	-4.2	-7.5	-8.5	-8.2	-7.1	-10.2
Temperatura máxima, °C	3.3	4.4	5.4	3.2	3.8	5.5
Temperatura mínima, °C	2.8	3.4	4.9	2.4	3.1	4.4

Comparando los resultados del escenario de cambio climático CMIP5-HADGEM_ES RCP 8.5 a futuro medio (2045-2069) con el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica (Tabla 50) a un futuro lejano (2075-2099), se observa que en primavera-verano existe una diferencia de 26.86% y en otoño-invierno de 3%, esto debido a que en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica se calculó el porcentaje de precipitación en todo el estado y el escenario de cambio climático del caso de estudio es específicamente en la cuenca, sin embargo, la tendencia negativa en el porcentaje de precipitación se conserva.

Tabla 50 Comparación del escenario de cambio climático del estudio con el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

Referencia	Proyección de precipitación, %	Primavera-Verano	Otoño-Invierno
		RCP 8.5	RCP 8.5
Atlas de Vulnerabilidad Hídrica		-8.5	-10.2
Escenario futuro medio (2045-2069)		-35.36	-13.2
Diferencia		26.86%	3%

Con respecto al Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México, la falta de lluvia en el estado de Chihuahua afecta al ciclo agrícola de temporal, con un índice del 72% considerado como alto, lo que propiciará el uso extensivo del agua de acuíferos y a su vez implica un riesgo en la calidad del recurso hídrico.



Capítulo VII: Conclusiones

Entre las características físicas de una cuenca, el uso de suelo y vegetación es la que más rápido cambia y; cuando se calcula el gasto máximo de diseño para una obra hidráulica se realiza con los datos históricos disponibles, sin embargo, en este trabajo se pudo observar que por cambiar el uso de suelo y la vegetación del año 2017 al año 2053 hubo una variación del caudal estimado de 9.48%.

La metodología de DINAMICA EGO es aplicable a casos donde se debe determinar el comportamiento del uso de suelo y la vegetación en un periodo de años específico, en este caso 36. El modelo de predicción podría ser ejecutado para generar un mapa de hasta 100 años, sin embargo, la certidumbre de éste se reduce.

Si además de considerar la escorrentía que se podría generar en el año 2053 con el mapa de uso de suelo y vegetación modelado se toma en cuenta el efecto de cambio climático, el gasto máximo de diseño para la presa El Rejón podría subir 41.52%.

El modelo de cambio climático utilizado no depende de la zona de estudio o de las características de la cuenca, se aplicó así debido a que el ACDM utiliza como base el sistema CMIP5 porque es el proyecto de comparación de modelos de clima acoplados más reciente aceptado por el IPcc, entre la variedad de modelos de cambio climático el HADGEM_ES es el que se utiliza para determinar anomalías meteorológicas, el forzamiento radiativo de 8.5 indica el caso más extremo y el futuro medio (2045-2069) es en el que se encuentra el año 2053.

7.1. Zona de estudio e infraestructura existente

La zona de estudio se escogió debido a que el crecimiento de la zona urbana construida se aprecia en los mapas de uso de suelo disponibles desde la serie I (1984) hasta el mapa más reciente serie VI (2017), además que este tipo de uso de suelo es muy impermeable por lo que afecta más a la escorrentía.



La presa El Rejón lleva en operación 53 años (1966-2019) y según el Sistema Nacional de Seguridad de Presas de CONAGUA no tiene daños estructurales aparentes, sin embargo el medio ambiente es cambiante y es responsabilidad de la gente a cargo de la operación y mantenimiento de la presa controlar constantemente el gasto que pasa por ella, esto no asegura que se pueda controlar una avenida mayor a la calculada como máxima, lo que en este caso y debido a que la ciudad de Chihuahua se encuentra aguas abajo de la presa El Rejón podría ocasionar pérdidas humanas y económicas.

7.3. Variables político-sociales

Para considerar el efecto que tienen las variables político-sociales, se analizó el Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Chihuahua visión 2040 en su versión 2016, el cual indica que se está construyendo un parque metropolitano llamado “Tres Presas” que contiene los vasos de las presas Chihuahua, Chuvíscar, y El Rejón.

Este proyecto va a contar con 14 estructuras pluviales para hacer eficiente la trayectoria del río Chuvíscar, sin embargo, en la Ilustración 44 se muestra como el IMPLAN de Chihuahua (Instituto Municipal de Planeación) propone una reorganización de la estructura vial, la cual podría generar mayor crecimiento de la mancha urbana hacia el área de la cuenca El Rejón.

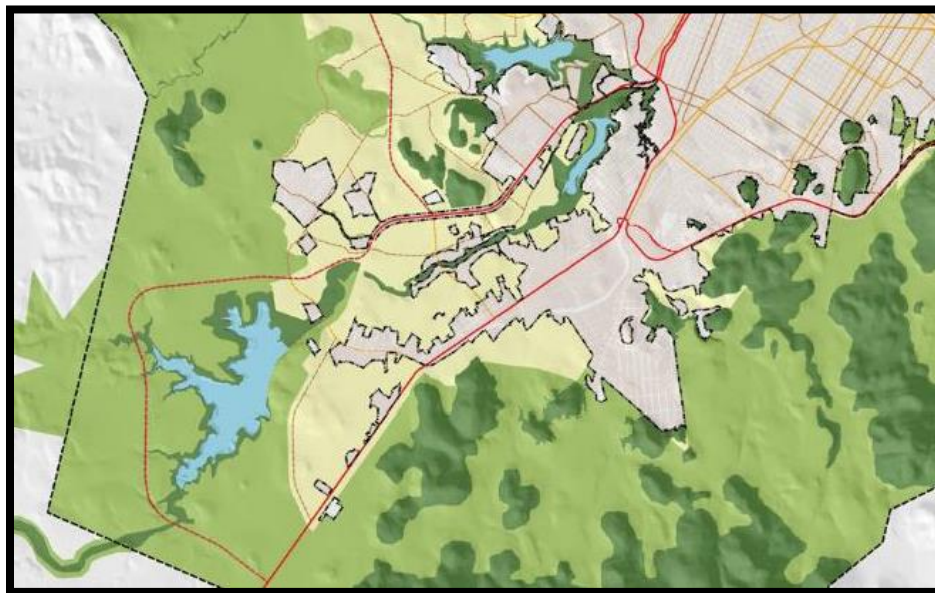


Ilustración 44 Propuesta de crecimiento surponiente. Fuente: IMPLAN Chihuahua, 2016.



7.4. Recomendaciones

En este apartado se busca dar recomendaciones con base en el análisis de resultados en la zona de estudio y la infraestructura existente, así como en el uso de autómatas celulares como inteligencia artificial para la predicción de uso de suelo.

7.4.1. En la zona de estudio y la infraestructura existente

En el caso específico de la cuenca de la presa El Rejón, es necesario reforestar la zona alta, debido a que el bosque de encino está decreciendo y convirtiéndose en pastizal inducido lo que provoca mayor escurrimiento, también se propone dentro del proyecto parque metropolitano “3 Presas” del IMPLAN al año 2040, conservar como zona natural el suelo en las cuencas de las presas Chihuahua, Chuvíscar y El Rejón para que las características del suelo no cambien.

Se recomienda analizar continuamente las políticas de operación de la infraestructura hidráulica actual, determinar si es necesario sobredimensionar o rehabilitar la obra como medio preventivo para no poner en riesgo a la comunidad de Chihuahua capital.

7.4.2. En la aplicación de autómatas celulares como inteligencia artificial para la predicción de uso de suelo

Los modelos predictivos de uso de suelo y vegetación tienen aplicación donde se requiere demostrar la tendencia de cambio en un ecosistema, para sugerir acciones que anticipen el resultado de la predicción.

Sin embargo, no es solo usar esta técnica de la inteligencia artificial solo por tenerla, su aplicación debe ser justificada por un porcentaje perceptible de cambio, es por esto que se usó la matriz de transición Markoviana, en este caso si el porcentaje de cambio entre tipos de uso de suelo por año fuese tan pequeño que entre todos los 19 años (del 1984 al 2003) no existiera un cambio significativo, no tendría caso realizar un mapa de predicción, el cambio podría ser tan insignificante en la cuenca que no tendría resultados significativos en el estudio hidrológico y por consiguiente en el análisis de los resultados.



No existe un criterio que defina qué tan grande o pequeño debe ser el cambio, esto depende del tamaño de la región que se pretende analizar, el uso que se le dará a los resultados y de la calibración de los autómatas celulares para la creación y expansión de parches.



Bibliografía y fuentes de referencia

- **Bower J., Christensen C. (1995).** Disruptive technologies: catching the wave, Harvard business review.
- **Sarmiento B., Hernández M., Gómez X., (2014).** Herramientas y antecedentes big data. Universidad Simón Bolívar, Colombia.
- **Fernández P. (2017).** Herramienta para la evaluación de la resiliencia en los sectores agrícola y forestal mediante tecnologías big data. Madrid, España.
- **Prashant K. (2017).** Geospatial technology for water resource applications. NASA GSFC USA.
- **Martínez J. (2017).** Conociendo los beneficios de la relación de big data y cloud computing. Universidad Libre, Colombia.
- **Escobar F. (2011).** TIG y autómatas celulares para el modelado de usos del suelo. Universidad de Alcalá. España.
- **Almeida Padilla O. (2005):** Autómatas celulares una alternativa para la geosimulación, Universidad de Alcalá Henares, España, 10 p.
- **Russell S., Norvig P. (2010).** Artificial intelligence a modern approach third edition. Pearson Education Inc.
- **Norris C., James R. (1998).** Markov chains. Cambridge University Press.
- **Márkov. A. (1906).** Rasprostranenie zakona bol'shih chisel na velichiny, zavisyaschie drug ot druga. Izvestiya Fiziko-matematicheskogo obschestva pri Kazanskom universitete.
- **Piquer S. (2019).** Los 12 mejores servicios para guardar tus archivos en la nube. PC World. Recuperado de:
<https://www.pcworld.es/mejoresproductos/almacenamiento/serviciosalmacenamiento-nube-3673539/#toc>
- **Barrientos A., del Cerro J., Gutiérrez P., San Martín R., Martínez A., Rossi A. (2017).** Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y sus aplicaciones. Grupo de robótica y cibernética, Universidad Politécnica de Madrid, España.



- **Fernández A., Zavala J., Romero R., (2019).** Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmosfera. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- **Solomon S., Qin D., Manning M., Enhen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H. (2007).** Summary for policymakers. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 23 pp.
- **Conde A., Gay C. (2008).** Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM.
- **Hulme M., Sheard, N. (1999).** Escenarios de cambio climático para Mesoamérica, Unidad de Investigación Climática, Universidad de Norwich, Reino Unido, 6pp.
- **Collins W., Bellouin N., Doutriaux Boucher M., Gedney N., Hinton T., Jones C., Liddicoat S., Martin G., O'Connor F., Rae J., Senior C., Totterdell I., Woodward S., Reichler T., Kim J. (2008).** Evaluación del modelo HADGEM2. Met Office Hadley Center Nota técnica no. HCTN 74, disponible en Met Office, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB <http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html>
- **El-Hames A.S. (2012).** An empirical method for peak discharge prediction in ungauged arid and semi-arid region catchments based on morphological parameters and SCS curve number. Saudi Arabia.
- **Kairong L., Fushui L., Chen L., Singh V., Zhang Q., Chen X. (2014).** Xinanjiang model combined with Curve Number to simulate the effect of land use change on environmental flow. Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-Sen University, Guang Zhou 510275, China.
- **Padilla O., Perez P., (2015).** Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. Latin America Journals Online.



- **Wang W., Zhang C. (2016).** Analysis and prediction of land use changes related to invasive species and major driving forces in the state of Connecticut. University of Connecticut.
- **Halmy M., (2015).** Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA. *Applied geography*. 63. 101-112. 10.1016/j.apgeog.2015.06.015.
- **Liping C., Yujun S., Saeed S., (2018).** Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques. A case study of a hilly area, Jiangle, China. *PLoS ONE* 13(7): e0200493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>.
- **Martínez P., Patiño C. (2012).** Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20. Recuperado en 27 de marzo de 2019: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S20072422201200010001&lng=es&tlng=es.
- **Arreguín F. (2000).** Obras de excedencia. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- **CONAGUA (2000).** Memoria descriptiva de la presa El Rejón, municipio de Chihuahua, Chihuahua. Sistema de Seguridad de Presas. Gobierno de la República.
- **FAO (2007).** Base referencial mundial del recurso suelo. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos.
- **IHHS (1995).** Balance hídrico superficial de la cuenca. Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura.
- **Ibáñez A., Moreno S., Gisbert Blanquer H. (2017).** Morfología de las cuencas hidrográficas. Escuela técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.
- **Arreguín F., López M., Rodríguez O., Montero M. (2015).** Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.

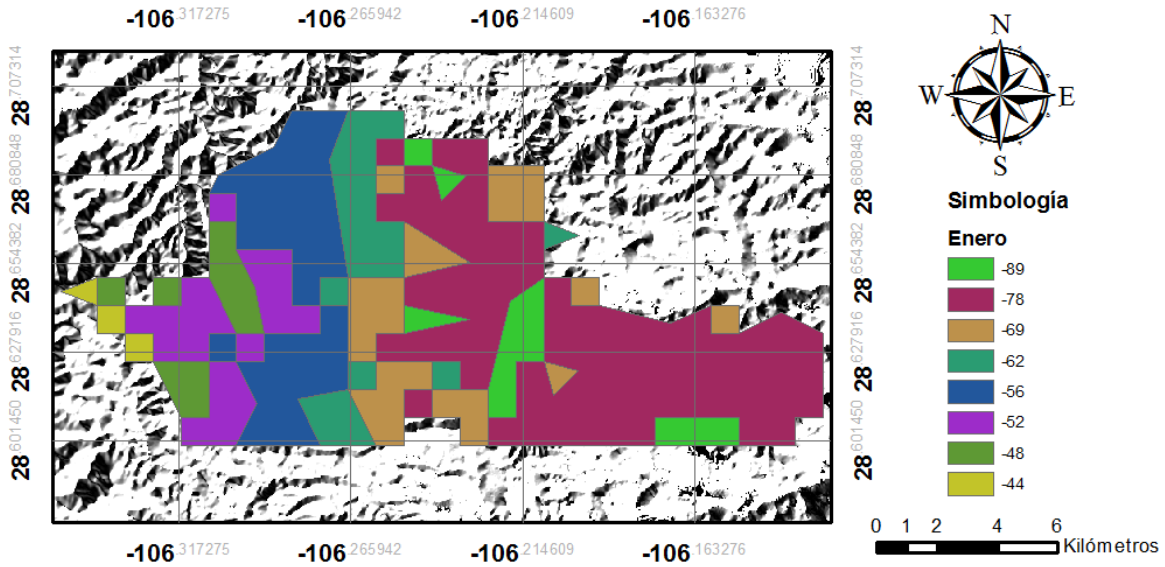


- **Britaldo S. Soares Filho, Hermann O. Rodrigues, William L. Costa (2009).** Modelando dinámicas ambientales con DINAMICA EGO. Universidad Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha. Brasil.
- **Salas M. (2002).** Un modelo mundial acoplado de hielo y océano marino. Modelado oceánico 4, 137-172.
- **Arreguín F., Alcocer V., (2011).** Diseño hidráulico de vertedores. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- **Rodríguez Y., Marrero de León N., Gil Urrutia L. (2010).** Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico.
- **Balcazar L., Mamadou K., Ganoa G., Magaña F. (2016).** Modelación lluvia-escurrimiento utilizando un modelo distribuido en una cuenca de los andes del sur de Ecuador. Congreso de manejo de cuencas hidrográficas. Veracruz, México.
- **Aparicio F. (1989).** Fundamentos de la hidrología de superficie. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelos, México.
- **Estrada G. (2008).** Conceptos básicos de hidrología. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.
- **Basharin A., Gely P., Langville C., Amy N., Naumov C., Valeriy A. (2004).** The Life and Work of A. A. Markov. USA.
- **Ramiro Pérez-Miranda, J. René Valdez Lazalde, Francisco Moreno Sánchez, Antonio, González Hernández, Juan I. Valdez Hernández (2011).** Predicción espacial de cambios del uso de suelo en Texcoco, Estado de México. Centro de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. México.
- **Link sin bibliografía:**
<https://www.imta.gob.mx/images/transpareciafocalizada/presas.pdf>

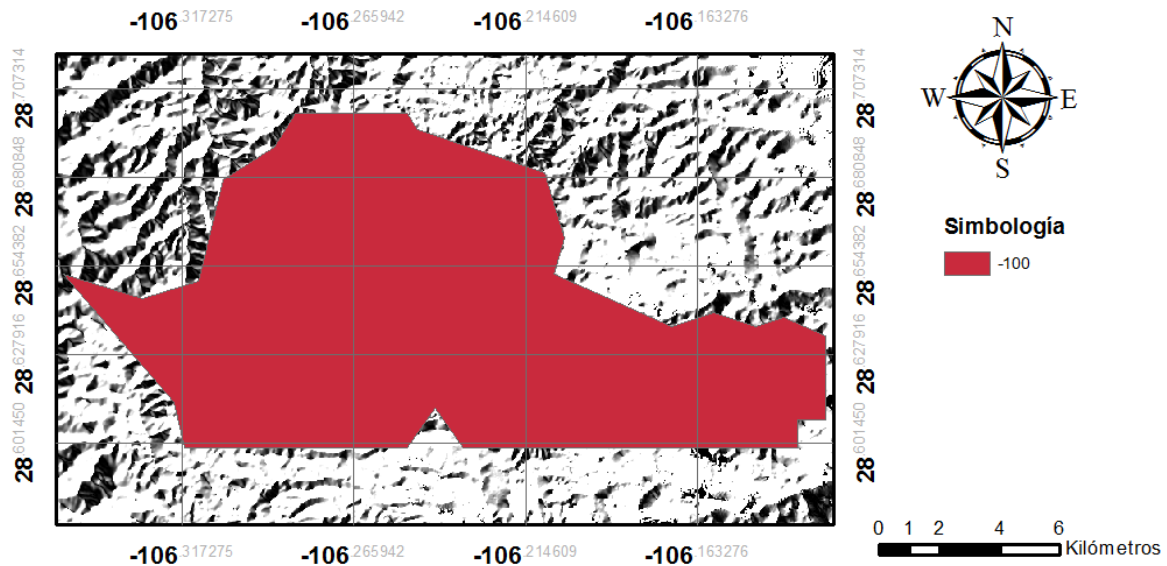


Anexos

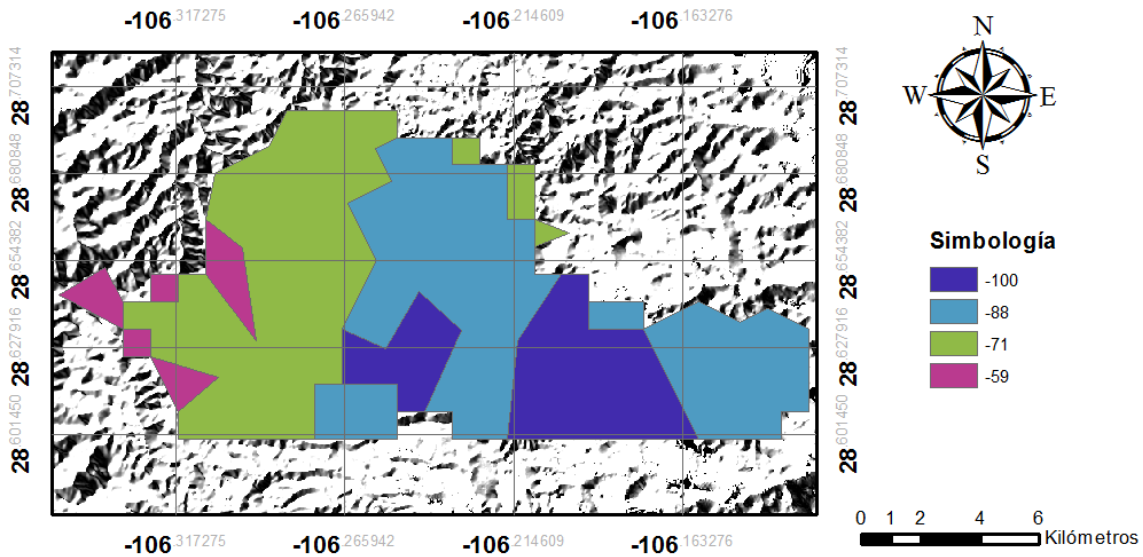
Anexo 1: Mapas resultantes del modelo de circulación global HADGEM2_ES RCP8.5 a futuro medio 2045-2069 en el sistema ACDM.



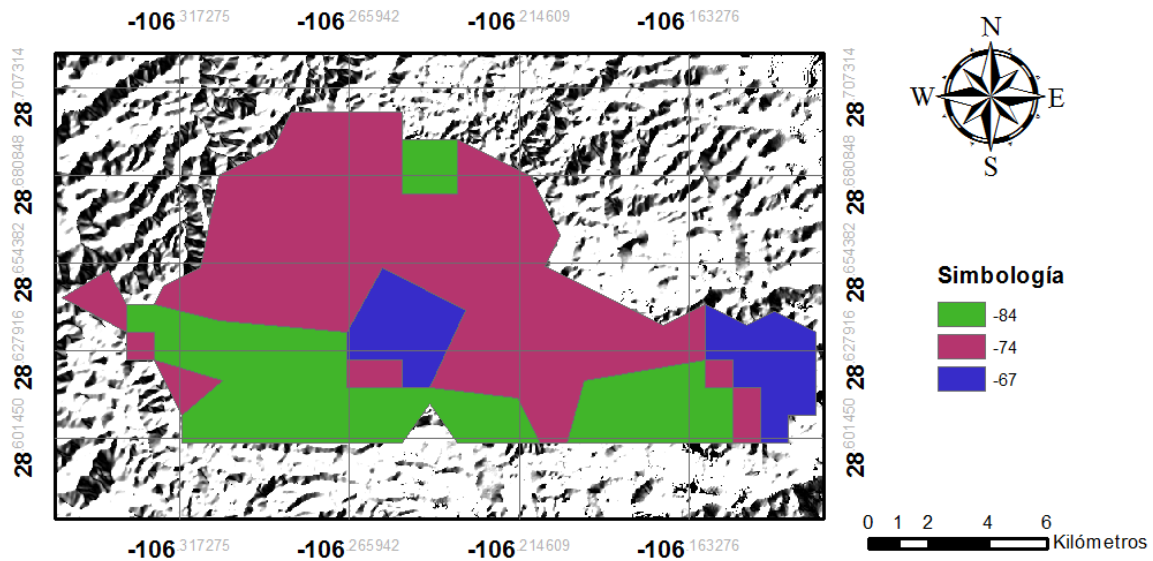
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de enero en la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



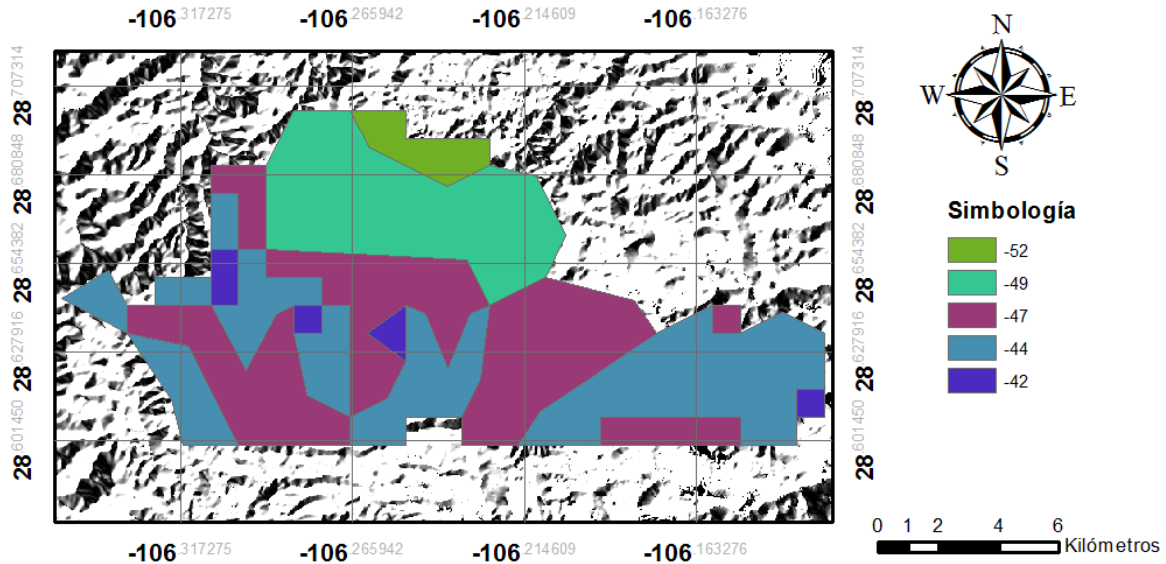
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de febrero en la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



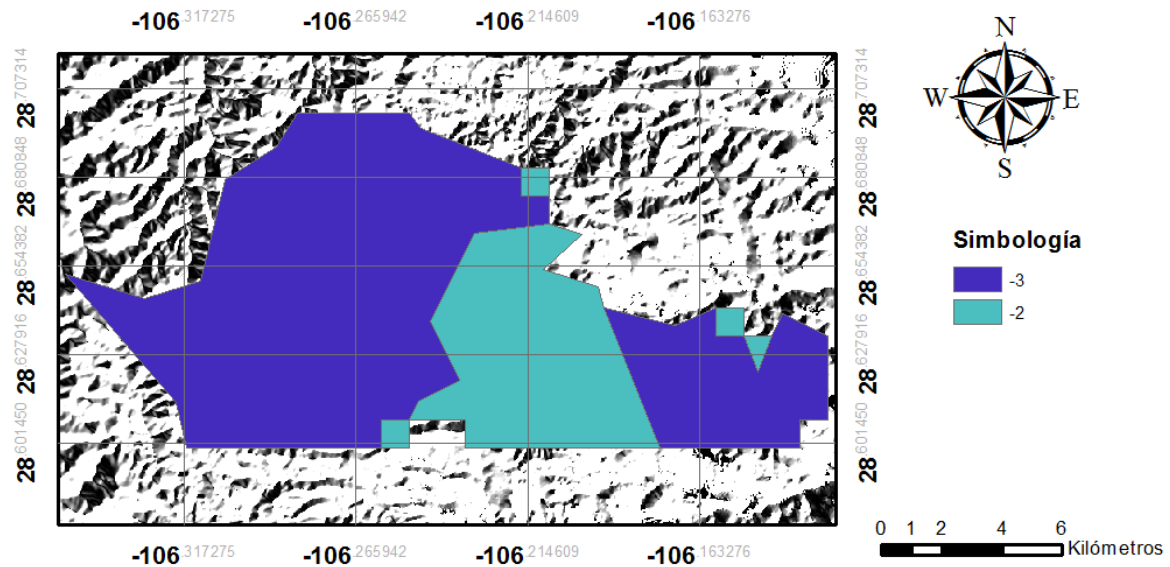
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de marzo en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



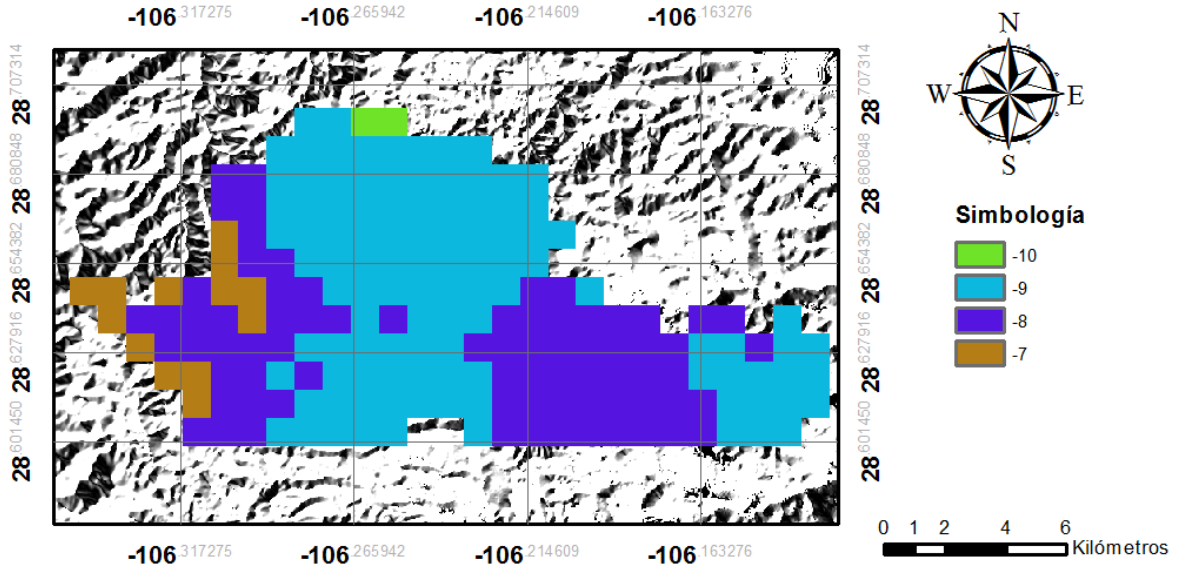
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de abril en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



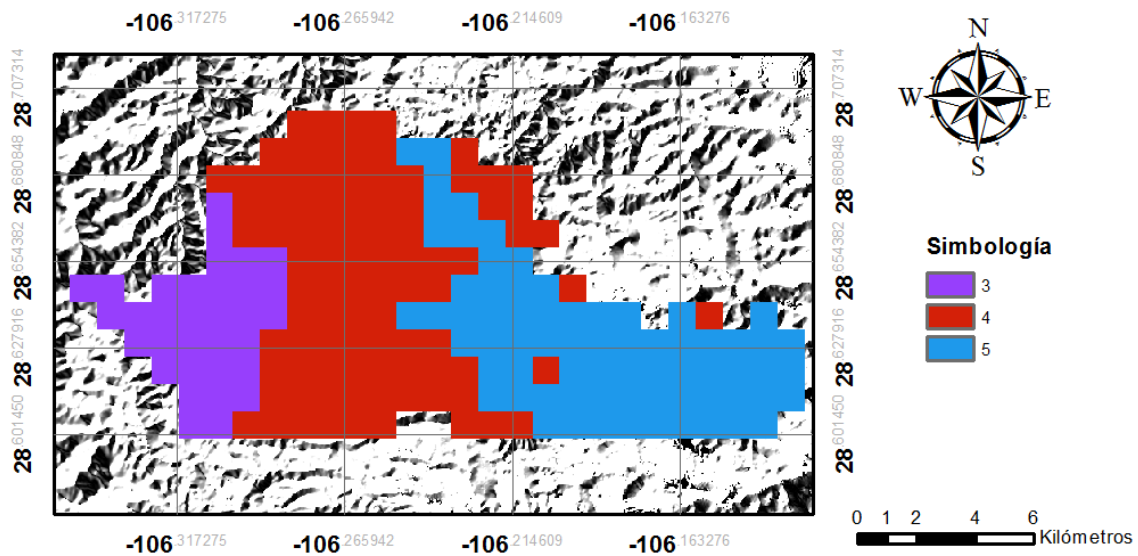
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de mayo en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



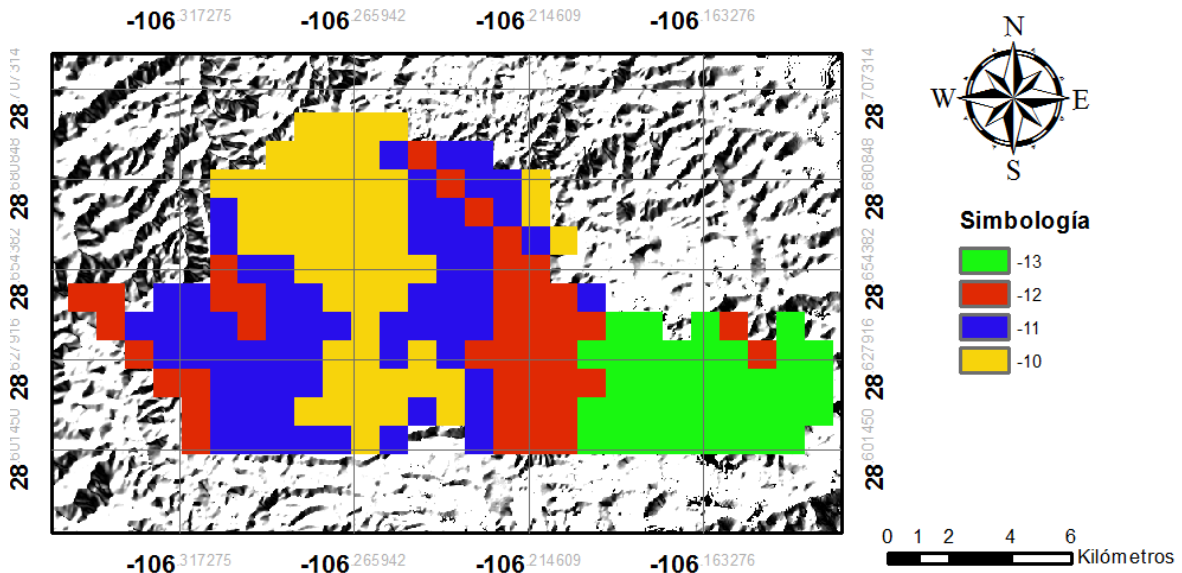
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de junio en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



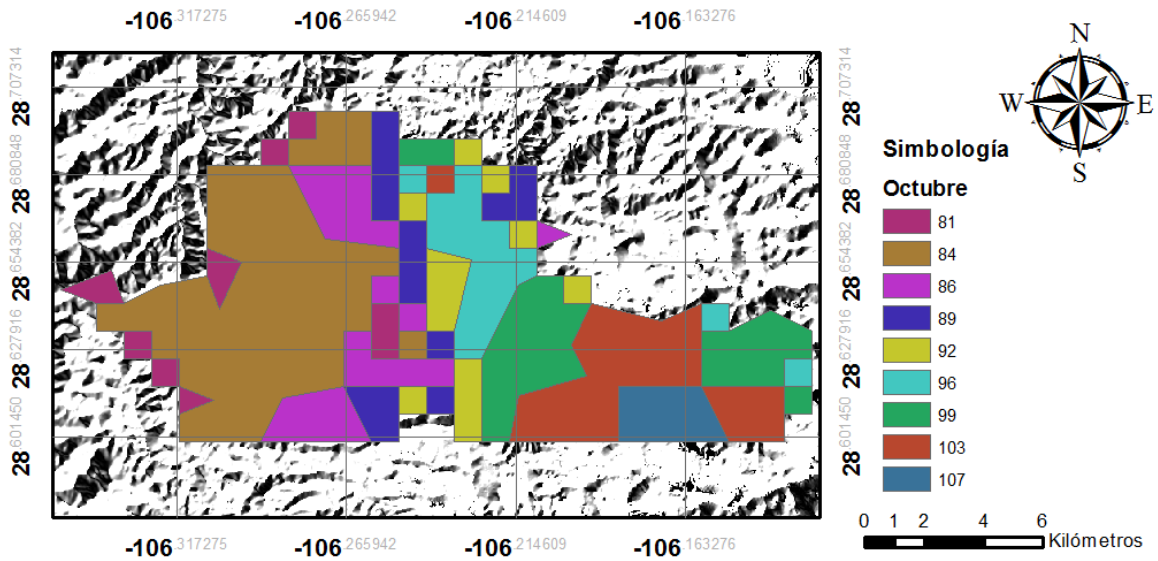
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de julio en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



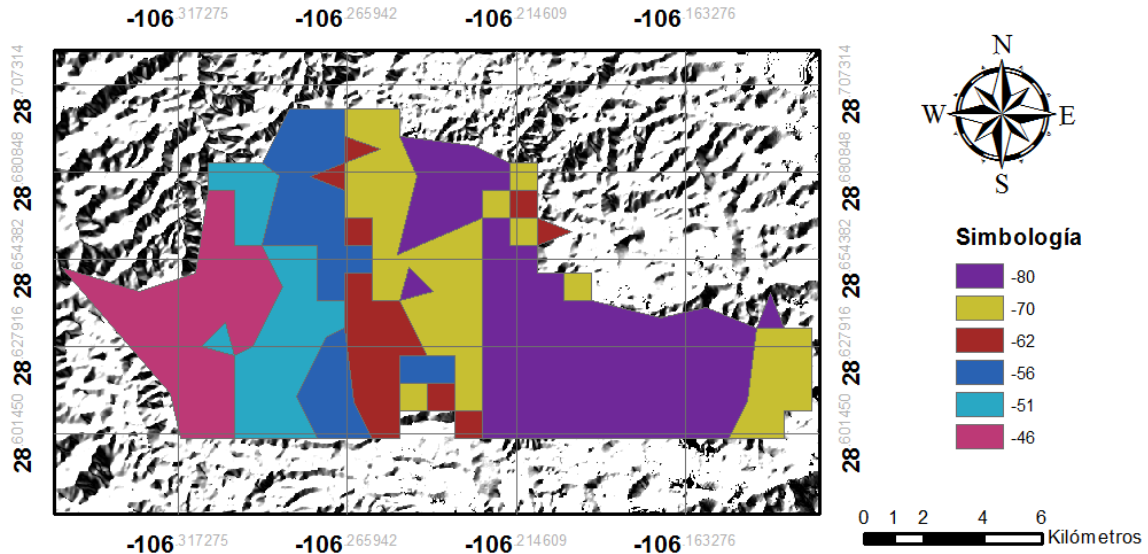
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de agosto en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



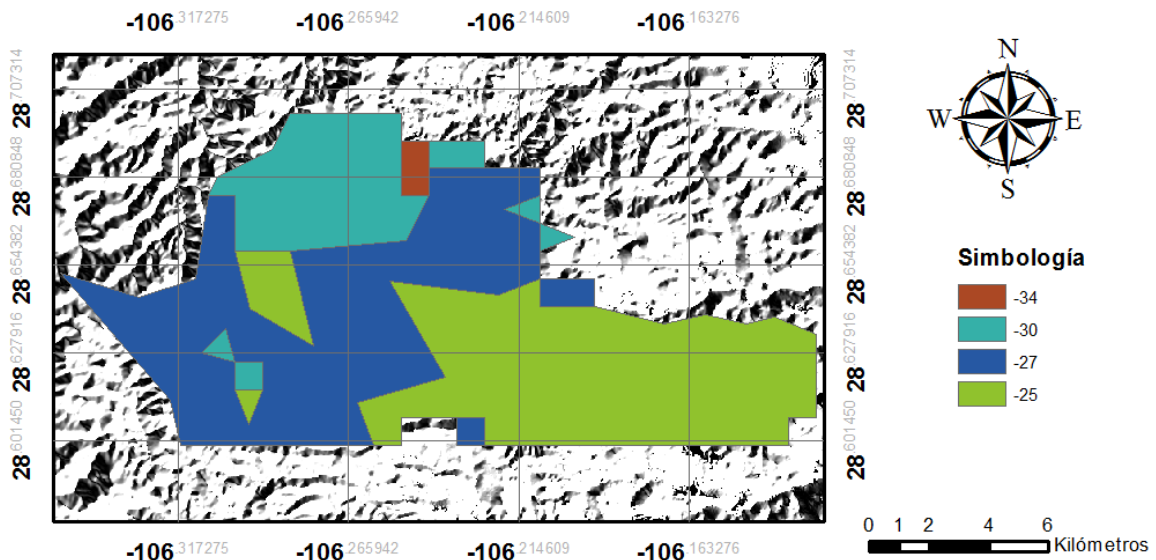
Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de septiembre en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de octubre en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de noviembre en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



Porcentajes de cambio de precipitación para el mes de diciembre en la cuenca de la Presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.



Anexo II: Resultado del modelo de circulación global HADGEM2_ES RCP8.5 a futuro medio 2045-2069 en el sistema ACDM por mes para el caso de estudio

Porcentaje de cambio de precipitación para todos los 12 meses del año en la cuenca de la presa El Rejón en Chihuahua, Chih., México. Fuente Elaboración propia con el escenario CMIP5 en el sistema del ACDM.

Enero				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond.	%C*Imp
-89	0.001	0.013	5.900	-5.251
-78	0.005	0.013	39.577	-30.870
-69	0.002	0.013	11.924	-8.227
-62	0.001	0.013	9.502	-5.891
-56	0.002	0.013	16.656	-9.328
-52	0.001	0.013	9.986	-5.193
-48	0.001	0.013	5.088	-2.442
-44	0.0002	0.013	1.367	-0.601
Total			100.000	-67.804

Febrero				
% Cambio	Área	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-100.00	0.013	0.013	100.00	-100.00
Total			100.00	-100.00

Marzo				
% Cambio	Área	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-100	0.003	0.013	18.801	-18.801
-88	0.005	0.013	40.089	-35.279
-71	0.005	0.013	35.652	-25.313
-59	0.001	0.013	5.458	-3.220
Total			100	-82.612

Abril				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-84	0.004	0.013	29.237	-24.559
-74	0.008	0.013	58.876	-43.568
-67	0.002	0.013	11.887	-7.964
Total			100.000	-76.092

Mayo				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-52	0.0005	0.013	3.53	-1.83
-49	0.0029	0.013	21.28	-10.43
-47	0.0050	0.013	37.08	-17.43
-44	0.0047	0.013	35.32	-15.54
-42	0.0004	0.013	2.79	-1.17
Total			100.00	-46.40

Junio				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-3	0.010	0.013	74.362	-2.231
-2	0.003	0.013	25.638	-0.513
Total			100.000	-2.744

Julio				
% Cambio	Área, adim	Área Total, adim	Pond	%C*Imp
-10	0.0001	0.013	1.034	-0.103
-9	0.007	0.013	54.818	-4.934
-8	0.005	0.013	38.703	-3.096
-7	0.001	0.013	5.445	-0.381
Total			100.00	-8.514

Agosto				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
5	0.005	0.014	36.773	1.839
4	0.006	0.014	46.111	1.844
3	0.002	0.014	17.117	0.513
Total			100.000	4.197



Septiembre				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-13	0.003	0.013	19.013	-2.472
-12	0.003	0.013	20.739	-2.489
-11	0.004	0.013	31.940	-3.513
-10	0.004	0.013	28.308	-2.831
Total			100.000	-11.305

Octubre				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
81	0.001	0.013	5.024	4.069
84	0.004	0.013	31.513	26.471
86	0.001	0.013	10.635	9.146
89	0.001	0.013	7.778	6.923
92	0.001	0.013	6.607	6.078
96	0.001	0.013	8.607	8.263
99	0.002	0.013	12.943	12.814
103	0.002	0.013	13.264	13.662
107	0.0005	0.013	3.630	3.884
Total			100.000	91.309

Noviembre				
% Cambio	Área, adim	Área Total	Pond	%C*Imp
-80	0.004	0.013	33.033	-26.427
-70	0.003	0.013	19.869	-13.909
-62	0.001	0.013	8.595	-5.329
-56	0.002	0.013	12.206	-6.835
-51	0.002	0.013	11.427	-5.828
-46	0.002	0.013	14.869	-6.840
Total			100.00	-65.167

Diciembre				
% Cambio	Área, adim	Área total, adim	Pond	%C*Imp
-34	0.0001	0.013	1.03	-0.35
-30	0.002	0.013	17.15	-5.14
-27	0.006	0.013	42.17	-11.38
-25	0.005	0.013	39.65	-9.91
Total			100	-26.79



- 2017 (Tr=25 años)

Table with 12 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and a group of 5 columns for 'Periodo de retorno de 25 años' (I, P, Pe, X, Q). Rows 10 to 570.

Table with 12 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and a group of 5 columns for 'Periodo de retorno de 25 años' (I, P, Pe, X, Q). Rows 580 to 1140.



ESTIMACIÓN DEL GASTO MÁXIMO DE DISEÑO PARA OBRAS HIDRÁULICAS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

- 2017 (Tr=100 años)

Table with 11 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and five columns for the 100-year return period (I, P, Pe, X, Q). Rows range from 10 to 570.

Table with 11 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and five columns for the 100-year return period (I, P, Pe, X, Q). Rows range from 580 to 1140.



ESTIMACIÓN DEL GASTO MÁXIMO DE DISEÑO PARA OBRAS HIDRÁULICAS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

- 2017 (Tr=1,000 años)

Table with 10 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and a sub-table for 'Periodo de retorno de 1000 años' with columns I (mm/hr), P (mm), Pe (mm), X (mm/hr), Q(m3/s).

Table with 10 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and a sub-table for 'Periodo de retorno de 1000 años' with columns I (mm/hr), P (mm), Pe (mm), X (mm/hr), Q(m3/s).



• 2017-IPcc (Tr=10,000 años)

Table with 11 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and a sub-table for 'Periodo de retorno de 10000 años' with columns I (mm/hr), P (mm), Pe (mm), X (mm/hr), and Q(m3/s). Rows range from d=10 to d=570.

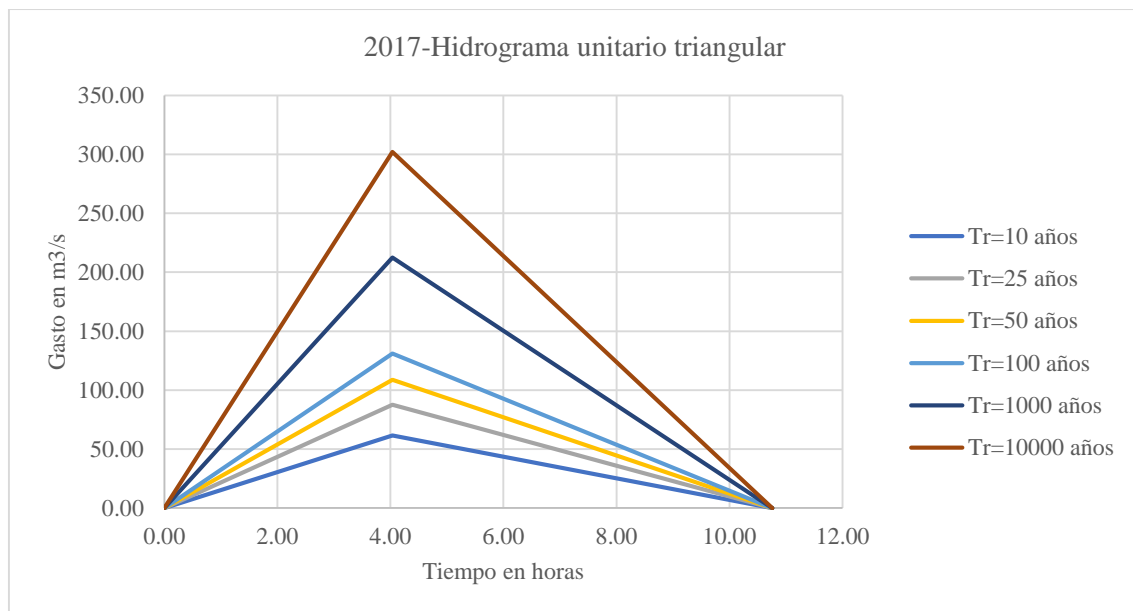
Table with 11 columns: d(min), d(hr), tp(hr), d/tp, Z, and a sub-table for 'Periodo de retorno de 10000 años' with columns I (mm/hr), P (mm), Pe (mm), X (mm/hr), and Q(m3/s). Rows range from d=580 to d=1140.



Anexo IV: Resultados del cálculo de los gastos máximos de diseño para los años 2017 y 2053 con y sin el IPcc para distintos periodos de retorno por el método del hidrograma sintético triangular

- 2017

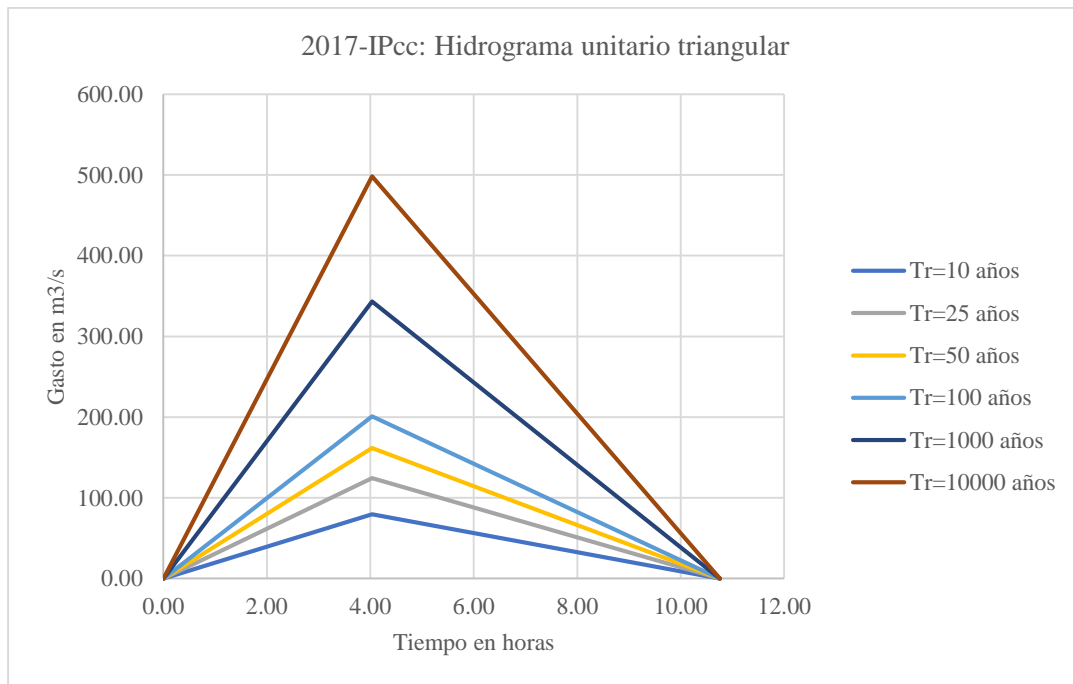
Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	25	50	100	1,000	10,000
A(km ²)	149.69					
tc(hr)	3.57					
I(mm/hr)	11.56	13.36	14.70	16.02	20.41	24.78
d(hr)	3.57					
P(mm)	41.31	47.74	52.53	57.25	72.94	88.56
P(cm)	4.13	4.77	5.25	5.73	7.29	8.86
N(adimensional)	78.79					
Pe(cm)	0.80	1.13	1.41	1.70	2.75	3.91
Pe(mm)	7.96	11.33	14.09	16.97	27.52	39.15
tp(hr)	4.03					
tb (hr)	10.76					
de (hr)	3.78					
Qp (m³/s)	61.42	87.47	108.70	130.93	212.40	302.11





- 2017 IPcc

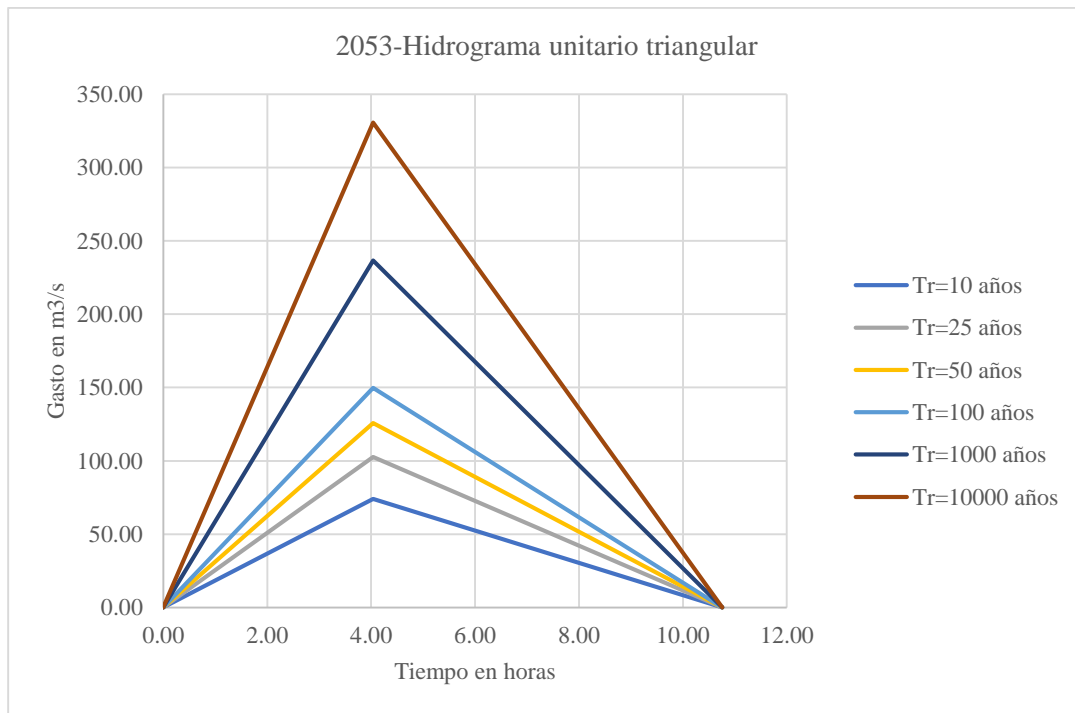
Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	25	50	100	1,000	1,0000
A(km ²)	149.69					
tc(hr)	3.57					
I(mm/hr)	12.83	15.65	17.74	19.82	26.68	33.52
d(hr)	3.57					
P(mm)	45.85	55.93	63.40	70.83	95.35	119.79
P(cm)	4.59	5.59	6.34	7.08	9.53	11.98
N(adimensional)	78.79					
Pe(cm)	1.03	1.61	2.09	2.60	4.45	6.45
Pe(mm)	10.30	16.14	20.94	26.03	44.46	64.54
tp(hr)	4.03					
tb (hr)	10.76					
de (hr)	3.78					
Qp (m³/s)	79.48	124.58	161.60	200.88	343.12	498.08





- 2053

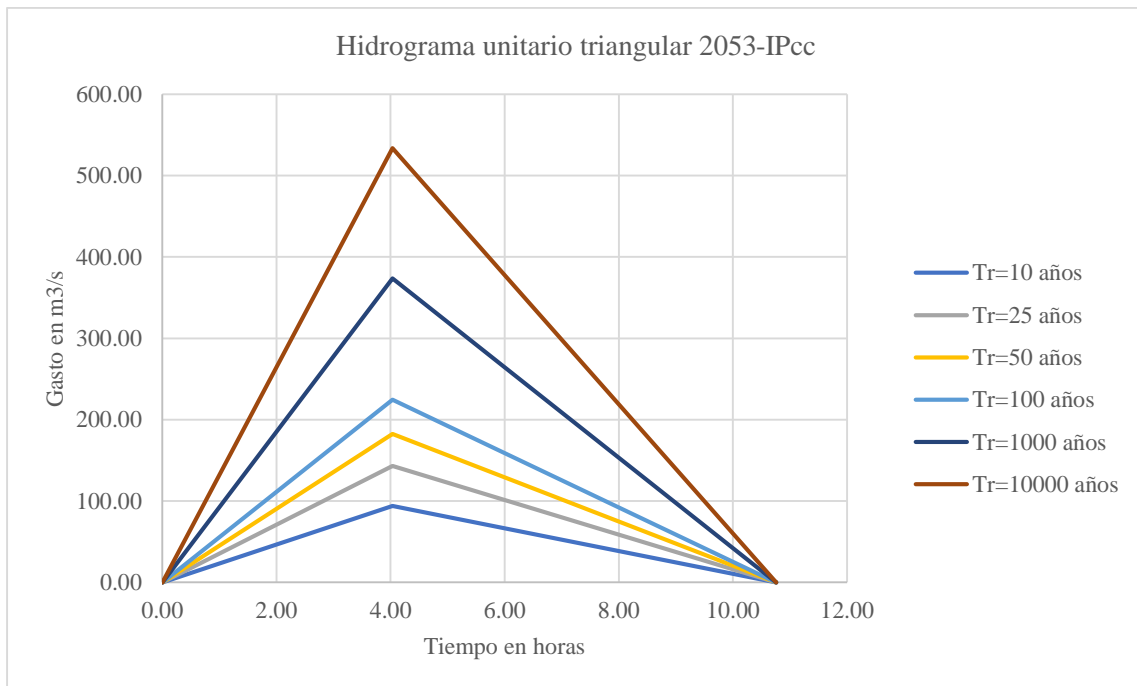
Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	25	50	100	1,000	1,0000
A(km ²)	149.69					
tc(hr)	3.57					
I(mm/hr)	11.56	13.36	14.70	16.02	20.41	24.78
d(hr)	3.57					
P(mm)	41.31	47.74	52.53	57.25	72.94	88.56
P(cm)	4.13	4.77	5.25	5.73	7.29	8.86
N(adimensional)	80.86					
Pe(cm)	0.96	1.33	1.63	1.94	3.07	4.29
Pe(mm)	9.59	13.31	16.31	19.42	30.66	42.86
tp(hr)	4.03					
tb (hr)	10.76					
de (hr)	3.78					
Qp (m³/s)	74.03	102.74	125.84	149.83	236.58	330.76





- 2053 IPcc

Datos	Periodo de retorno T_r , en años					
	10	25	50	100	1,000	10,000
A(km ²)	149.69					
tc(hr)	3.57					
I(mm/hr)	12.83	15.65	17.74	19.82	26.68	33.52
d(hr)	3.57					
P(mm)	45.85	55.93	63.40	70.83	95.35	119.79
P(cm)	4.59	5.59	6.34	7.08	9.53	11.98
N(adimensional)	80.86					
Pe(cm)	1.22	1.85	2.37	2.91	4.84	6.92
Pe(mm)	12.18	18.53	23.67	29.08	48.40	69.17
tp(hr)	4.03					
tb (hr)	10.76					
de (hr)	3.78					
Qp (m³/s)	93.99	142.99	182.67	224.39	373.50	533.82





Anexo V: Resultados del cálculo de gasto máximo de diseño por el método racional para distintos periodos de retorno para los años 2017 y 2053 considerando el IPcc y sin él.

- 2017

Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	20	50	100	1,000	10,000
A(m ²)	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00
tc(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
I(mm/hr)	22.53	25.36	28.69	30.98	37.58	43.21
d(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
Prec. Pond.	80.44	90.55	102.44	110.61	134.17	154.29
Prec. Cal. Mm	41.31	47.74	52.53	57.25	72.94	88.56
Prec. Cal. Cm	4.13	4.77	5.25	5.73	7.29	8.86
N(adimensional)	78.79	78.79	78.79	78.79	78.79	78.79
Pe(cm)	0.80	1.13	1.41	1.70	2.75	3.91
Pe(mm)	7.96	11.33	14.09	16.97	27.52	39.15
C	0.19	0.24	0.27	0.30	0.38	0.44
tp(hr)	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
Qp (m³/s)	180.46	250.33	319.87	381.71	589.57	794.30

- 2017-IPCC

Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	20	50	100	1,000	10,000
A(m ²)	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00
tc(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
I(mm/hr)	22.34	26.03	30.69	34.11	45.12	55.86
d(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
Prec-Ponderada	79.77	92.94	109.58	121.78	161.09	199.45
Prec. Cal. Mm	41.31	47.74	52.53	57.25	72.94	88.56
Prec. Cal. Cm	4.13	4.77	5.25	5.73	7.29	8.86
N(adimensional)	78.79	78.79	78.79	78.79	78.79	78.79
Pe(cm)	0.80	1.13	1.41	1.70	2.75	3.91
Pe(mm)	7.96	11.33	14.09	16.97	27.52	39.15
C	0.19	0.24	0.27	0.30	0.38	0.44
tp(hr)	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
Qp (m³/s)	178.96	256.94	342.14	420.29	707.89	1026.77

- 2053

Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	20	50	100	1,000	10,000
A(m ²)	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00
tc(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
I(mm/hr)	22.53	25.36	28.69	30.98	37.58	43.21
d(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
Prec-Ponderada	80.44	90.55	102.44	110.61	134.17	154.29
Prec. Cal. Mm	41.31	47.74	52.53	57.25	72.94	88.56
Prec. Cal. Cm	4.13	4.77	5.25	5.73	7.29	8.86
N(adimensional)	80.86	80.86	80.86	80.86	80.86	80.86
Pe(cm)	0.96	1.33	1.63	1.94	3.07	4.29
Pe(mm)	9.59	13.31	16.31	19.42	30.66	42.86
C	0.23	0.28	0.31	0.34	0.42	0.48
tp(hr)	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
Qp (m³/s)	217.53	294.03	370.31	436.81	656.69	869.61



- 2053-IPcc

Datos	Periodo de retorno Tr, en años					
	10	20	50	100	1,000	10,000
A(m ²)	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00	14969.00
tc(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
I(mm/hr)	22.34	26.03	30.69	34.11	45.12	55.86
d(hr)	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57	3.57
Prec-Ponderada	79.77	92.94	109.58	121.78	161.09	199.45
Prec. Cal. Mm	41.31	47.74	52.53	57.25	72.94	88.56
Prec. Cal. Cm	4.13	4.77	5.25	5.73	7.29	8.86
N(adimensional)	80.86	80.86	80.86	80.86	80.86	80.86
Pe(cm)	0.96	1.33	1.63	1.94	3.07	4.29
Pe(mm)	9.59	13.31	16.31	19.42	30.66	42.86
C	0.23	0.28	0.31	0.34	0.42	0.48
tp(hr)	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
Qp (m³/s)	215.72	301.79	396.09	480.96	788.48	1124.12