

Proyección Markoviana de riesgos hidrometeorológicos para el cálculo actuarial en México al 2020

Markovian projection of hydrometeorological risks for actuarial calculation in Mexico up to 2020

David Conaly Martínez Vázquez*

Héctor Pérez Ávila**

(Fecha de recepción: 27 de junio de 2020. Fecha de aceptación: 17 de septiembre de 2020)

RESUMEN

La temperatura del planeta ha cambiado drásticamente en los últimos años, durante el período 2015-2019 se registró la etapa más calurosa jamás observada según la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Lo anterior repercute en el aumento del nivel del mar y en general, en todos los fenómenos hidrometeorológicos que generan millones de pérdidas patrimoniales cuando tocan las costas y el interior de un país. El objetivo de este artículo es pronosticar la generación de ciclones tropicales en los océanos Pacífico y Atlántico en el año 2020 mediante cadenas de Markov, debido a que este tipo de sucesos son elementos fundamentales para el cálculo de primas de riesgo en seguros de huracán y otros riesgos hidrometeorológicos. La hipótesis de la que se parte, es que debido al incremento sustancial de la temperatura del planeta, habrá un mayor número de ciclones tropicales y huracanes de mayor intensidad. Se ha seleccionado esta metodología estocástica debido a las características aleatorias

* Licenciatura en Ciencias Empresariales.
Universidad de la Costa, Oaxaca, México
david.martinez@uncos.edu.mx. ORCID: 0000-0003-3337-7165

** Universidad Autónoma del Estado de México,
Unidad Académica Profesional Huehuetoca, Edo. de México, México
hector_1604@hotmail.com. ORCID: 0000-0001-5040-3834

y pérdida de memoria de estos sistemas atmosféricos, así como a la posibilidad de construcción de intervalos de confianza para cada estimación. Los resultados empíricos se comparan con las proyecciones estimadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), obteniendo los mismos resultados en ambos océanos. En futuras investigaciones se considera ampliar la investigación a otros riesgos asociados a carteras de bienes asegurables.

Clasificación JEL: C15, C46, C53, G22, Q54

Palabras Clave: seguros, huracanes, cadena de Markov.

ABSTRACT

The planet's temperature has changed dramatically in recent years, according to the World Meteorological Organization (WMO), the 2015-2019 period was documented as having the highest average temperatures on record. This directly impacts the rise in sea level and all the hydrometeorological phenomena in general, which in turn bring about millions in losses when they reach the coastal areas of a country. The objective of this article is to forecast the generation of tropical cyclones in the Pacific and Atlantic oceans for the year 2020 using Markov chains, since these types of events are fundamental elements for calculating risk premiums for hurricane and other hydrometeorological risks insurance. The hypothesis on which this is based is that due to the substantial increase in the temperature of the planet, there will be a larger number of tropical cyclones and hurricanes of greater intensity. The stochastic methodology used has been selected due to the random characteristics and memory loss of these atmospheric systems, as well as the possibility of constructing confidence intervals for each estimate. The empirical results are compared with the projections estimated by the National Water Commission (CONAGUA), obtaining the same results in both oceans. Future research considers expanding the research to other risks associated with insurable asset portfolios.

JEL Classification: C15, C46, C53, G22, Q54

Keywords: Insurance, Hurricanes, Markov Chain.

Introducción

Los huracanes son uno de los fenómenos naturales más devastadores en términos económicos. En México, de mediados de mayo a finales de noviembre, ocurre la temporada de huracanes o ciclones tropicales, los cuales son fenómenos hidrometeorológicos que producen vientos con gran capacidad de destrucción, lluvias locales, inundaciones y tornados. Por la ubicación geográfica de México, sus costas se encuentran rodeadas por los océanos Pacífico y Atlántico, y por tanto, es más propicio a sufrir grandes pérdidas. En

la CIRCULAR S-10.1.11 *Seguro de huracán y/u otros riesgos hidrometeorológicos* publicado por el *Diario Oficial de la Federación* (2007), se establecen las bases técnicas, lineamientos para la evaluación y construcción de reservas y primas de riesgo asociadas a carteras de bienes por cubrir, por parte de las compañías de seguros contra daños producidos por estos fenómenos naturales. En dicho documento, se describen las variables que intervienen en cada uno de los fenómenos hidrometeorológicos considerados, como la marea de tormenta, viento generado por huracanes, lluvia local, maremotos, modelo de granizo, modelo de inundación, etcétera. En particular en marea de tormenta, viento generado por huracanes y lluvia local, una variable significativa es el número de tormentas y huracanes así como su grado de intensidad, para el cálculo de primas de riesgo y reservas.

El objetivo del presente artículo es la construcción de un modelo estocástico para la predicción de huracanes y tormentas tropicales en los océanos Pacífico y Atlántico en el año 2020. Para esto, se utiliza el registro de frecuencias de estos fenómenos únicamente durante los años 2015 al 2019, ya que este período se considera el de mayor temperatura jamás registrada según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en ambos océanos. Las hipótesis de las que se parte son que debido a este incremento sustancial de la temperatura en el planeta y en particular en los océanos, habrá una tendencia al alza en la generación de huracanes y tormentas tropicales en los próximos años, y que este fenómeno debe ser incluido en las variables que intervienen para el cálculo de primas de riesgo y reservas dentro del ramo daños. Los mencionados fenómenos meteorológicos generan miles de millones de pérdidas económicas a nivel Mundial. Por ejemplo, el Huracán Harvey en el año 2017 ocasionó pérdidas económicas superiores a los 100 mil millones de dólares. Es también objetivo de este proyecto, ofrecer una herramienta probabilística relativamente sencilla para poder llevar a cabo las predicciones antes mencionadas

La razón principal para la modelación de estos fenómenos mediante esta metodología es la naturaleza de los datos (sucesos aleatorios que evolucionan o migran conforme al paso del tiempo), los cuales sucedieron en un marco de características únicamente válido durante el periodo 2015-2019. Es decir, la temperatura en décadas o años anteriores evidentemente menor, no incide en la frecuencia ni severidad de este quinquenio. En otros términos, posee la característica de pérdida de memoria; y por tanto, lo que pudiera ocurrir en el año 2020, depende únicamente de lo sucedido de 2015 a 2019, característica Markoviana de que el futuro sólo depende del presente.

Si se tratara de analizar este fenómeno con alguna técnica econométrica, se tendría que considerar que existen años atípicos o con mayor actividad (como los que se mencionan), para así cumplir con la rigurosidad matemática, además que la temperatura del planeta y de los océanos ha cambiado desde años atrás, y por lo tanto la información histórica no sería de relevancia. La justificación del análisis de este fenómeno en el lapso de tiempo antes mencionado se fundamenta en tres aspectos: primero al hecho de que de 2015 al 2019 se registraron las mayores temperaturas jamás observadas en el planeta, por lo que al incrementar la temperatura de manera atípica existe un mayor riesgo de ocurrencia de estos fenómenos hidrometeorológicos, y el objetivo fundamental de esta investigación, como se menciona en párrafos anteriores es pronosticar el número de este tipo de riesgos que dependiendo de la categoría (existen cinco en la escala Saffir-Simpson) pueden provocar pérdidas patrimoniales. Este tipo de análisis se lleva a cabo definiendo un lapso de tiempo significativo, no obstante, un punto fundamental en este artículo es considerar las singularidades climáticas (inundaciones, huracanes, desequilibrio hidrológicos) percibidas en los últimos cinco años de observación, provocadas por condiciones climáticas jamás registradas antes del periodo estudiado. En segundo lugar, considerando la propuesta de analizar el período 2015-2019 desde la perspectiva de evaluación estocástica y regional de riesgos, se analiza de forma independiente la incidencia de estos fenómenos en los océanos Atlántico y Pacífico. Y en tercer lugar, si bien es cierto que en la literatura existen estudios de aplicación de cadenas de Markov para la predicción de este tipo de riesgos con diferentes temporalidades, dos años, quince años, treinta y siete años, etcétera, la propuesta de este análisis es considerar el quinquenio antes mencionado como un caso aparte debido a las singularidades excepcionales presentadas. El poder de predicción de esta estructura matemática radica en las características propias de la matriz Markoviana, que como se demostrará más adelante cumple con todos los requisitos para poder predecir a corto plazo. Es importante subrayar, que estos modelos se construyen a partir de frecuencias estocásticas, y si en un intervalo de tiempo existe una mayor actividad de estos fenómenos, esto incrementará el riesgo de pérdidas económicas en todos los sectores económicos.

En el siguiente apartado se hace una revisión de la literatura de las cadenas de Markov, así como su relación con los fenómenos hidrometeorológicos y actuariales. En el segundo apartado se desarrolla la metodología utilizada

en la presente investigación y por último se presenta la evidencia empírica y conclusiones obtenidas a partir de la investigación.

1. Revisión de la literatura

En la naturaleza, economía, finanzas y en general en cualquier rama de la ciencia suelen ocurrir fenómenos aleatorios que pueden tener múltiples resultados y que con el paso del tiempo, van evolucionando o migrando entre estos mismos estados. Los procesos estocásticos son una importante herramienta para la construcción de estructuras matemáticas, y métodos de predicción de estos sucesos, en particular por la pérdida de memoria y la posibilidad de capturar el dinamismo con el cual ocurren.

Los procesos de Markov son atribuidos al matemático ruso Andréi An-dréyevich Márkov, fue el primero en formalizar dichos procesos en 1906, sus obras han sido bastamente estudiadas, Basharin, Langville y Naumov (2004) y Von Hilgers y Langville (2006) señalan la primera aplicación que el mismo Markov realizó de sus cadenas en el poema de A.S. Pushkin "Eugeny Onegin.", en el cual analiza la distribución de las vocales y las consonantes, actualmente las aplicaciones de las cadenas de Markov tienen aplicaciones nodales para la predicción de fenómenos naturales.

Las cadenas de Markov se han considerado como una herramienta para la realización de predicciones en fenómenos meteorológicos, ayudan en la síntesis y pronóstico de días húmedos y secos. Se atribuye a Gabriel y Neumann (1962) la implementación del primer modelo de cadenas de Markov de primer orden para pronosticar la ocurrencia diaria de lluvia (Lennartsson, Baxevani y Chen, 2008; Wilks y Wilby, 1999). En la misma línea de investigación se encuentran los trabajos de Ortiz y Ruiz (2012) y Vide (1989) observan que las cadenas de Markov son de gran utilidad para el pronóstico meteorológico, el cual incluye el determinar los días consecutivos tanto lluviosos como de sequía.

Mangaraj, Sahoo y Sukla (2013) trabajan cadenas de Markov con datos de un período de 29 años del estado de Orissa en India, teniendo como eje nodal la suposición de que la ocurrencia de un día lluvioso depende de lo sucedido un día antes. Tettey, Adedia y Abaye (2017) construyen cadenas de Markov para estudiar patrones de lluvia en diversos asentamientos humanos en las costas de Ghana, con información de un período de 30 años, además señalan que el calentamiento mundial está cambiando los patrones de lluvia.

Después de la revisión de literatura donde fueron utilizados modelos estocásticos de cadenas de Markov en el análisis de la lluvia, se procede a centrar la atención en el análisis de los fenómenos meteorológicos de los huracanes.

Asaduzzaman y MahbulLatif (2012) y Asaduzzaman y Latif (2014) realizan procesos de renovación de Markov para la modelación de ciclones en Bangladesh durante 1877 a 2009. Chu y Zhao (2007) pronostican el desenvolvimiento de ciclones tropicales ubicados en la parte central del Pacífico Norte, con un período de análisis de 1966 a 2003, considerando que la información anterior a 1966 es menos confiable debido a la insuficiencia de observaciones satelitales, otros autores se han apoyado en método de Monte Carlo entre ellos Frank y Young (2007) al analizar la variabilidad de los ciclones en todas las cuencas en donde se desarrollan ciclones en el planeta durante los años 1985 a 2003. En adición al desenvolvimiento de los ciclones tropicales, Wooten y Tsokos (2008) utilizan procesos Markovianos con información histórica recabada durante la temporada de huracanes de 2004 y 2005 para observar probabilidades de transición empíricas en la intensidad, Jing y Lin (2020) realizan un estudio de la evolución de la intensidad de ciclones en el Norte del océano Atlántico señalando que el cambio de una intensidad de la tormenta a otra intensidad es considerada una cadena de Markov. Los seguros ante catástrofes naturales, deberían de ser una prioridad para las poblaciones susceptibles a impactos de fenómenos meteorológicos como lo son los ciclones debido al daño potencial que pueden ocasionar a la infraestructura de centros poblacionales, principalmente en zonas costeras. Las predicciones estacionales en torno a los ciclones tropicales son de gran importancia para las compañías de seguros y reaseguros (Camargo, Barnston, Klotzbach y Landsea, 2007).

Los seguros que cubren ante fenómenos meteorológicos extremos no se limitan únicamente a seguros para la vivienda de las poblaciones costeras, una de las actividades económicas que tiene acceso a este tipo de instrumentos financieros es la actividad agraria, la cual es vital, principalmente en países en vías del desarrollo y economías en transición, Roberts (2005) y Wenner (2005) concuerdan en que los productos de seguros agrícolas son cada vez más importantes para los gobiernos, un ejemplo son los seguros de cosechas los cuales cubren automáticamente ante huracanes, a raíz del daño potencial que pueden causar a la producción del campo. Una de las razones por las que las compañías de seguros y reaseguros deben tener amplia información sobre las predicciones estacionales de los futuros fenómenos na-

turales es el daño que pueden infringir en términos económicos y sociales. Entre los fenómenos naturales más devastadores para las sociedades se encuentran los fenómenos hidrometeorológicos, y entre ellos, los más devastadores son los ciclones, los autores que analizan el costo derivado de estos fenómenos (Enfedaque y Martínez, 2014; Chaves y Martínez, 2011; Belasen y Polachek 2008; Hori y Schafer, 2010), concuerdan en que el daño económico de los fenómenos meteorológicos extremos afectan a profundidad la estructura social a causa de las implicaciones de fondo que no se limitan a la pérdida de infraestructura únicamente, suceden también pérdidas humanas, fenómenos migratorios, precariedad en el mercado laboral, vulnerabilidad del sistema de salud y educación, y fragmentación en el tejido social.

Los efectos de huracanes de alta intensidad no son a corto plazo, Hsiang y Jina (2014) señalan que tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo la reducción en la renta *per cápita* es significativa, alrededor de 7.4% durante los 20 años siguientes con respecto a la tendencia observada antes del golpe del fenómeno meteorológico. Los asentamientos humanos deben prepararse no solamente para afrontar los fenómenos meteorológicos más extremos, ya que también los de baja intensidad afectan considerablemente el desenvolvimiento económico, ocasionando una preocupante interrupción en los negocios (Burrus, Dumas, Farrell y Hall, 2002). Jovel (1989) en una publicación de la CEPAL, realiza un análisis de las incidencias de desastres naturales tanto económicas como sociales en el desarrollo de la región de América Latina y el Caribe, justificando la implementación de medidas de prevención, planificación y preparación encaminadas a diluir los efectos futuros de fenómenos naturales. Entre los fenómenos naturales más devastadores en la región se encuentra el Huracán Joan de 1988 que golpeó con fuerza a Nicaragua, 2.8 millones de personas fueron afectadas, destruyendo viviendas e infraestructura agrícola e industrial, representando el 40% de su producto interno bruto, deteriorando las finanzas públicas en años subsiguientes a causa del gasto en rehabilitación y reconstrucción.

2. Metodología

Cadenas de Markov

En la naturaleza y en general en todas las ciencias exactas, ocurren fenómenos aleatorios cuyo resultado es incierto y que evolucionan entre distintos estados conforme al paso del tiempo. Para este tipo de sucesos, los procesos estocásticos son una herramienta adecuada para su modelación. Una matriz

Markoviana es una estructura estocástica, que representa la transición en el tiempo de un fenómeno aleatorio que puede migrar entre múltiples resultados, ésta puede ser a tiempo discreto o continuo, dependiendo de la periodicidad de los saltos entre las frecuencias de dicho fenómeno. En el caso de esta investigación se considera tiempo discreto debido a la periodicidad de los reportes y fenómenos aleatorios. Los niveles de intensidad de los ciclones formarán el espacio de estados a partir de los cuales se construirá la matriz estocástica.

Cada matriz Markoviana debe tener las siguientes características:

$$P = \xi \begin{bmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Poseer un espacio de estados ξ , el cual es el conjunto de posibles resultados en el cual el fenómeno aleatorio puede transitar a lo largo del tiempo. En cada matriz Markoviana el estado presente se ubica en la parte izquierda de la misma, y el estado futuro del proceso en la parte superior de la matriz, además debe ser una matriz de igual número de columnas como de filas.

Donde cada $a_{ij} \geq 0$, ya que representa una probabilidad de transición entre los estados, y se tiene que $\sum_j^n a_{ij} = 1$. Una de las características fundamentales de las matrices Markovianas es la pérdida de memoria, lo cual significa que la probabilidad de que el fenómeno analizado esté en el futuro en algún estado, depende únicamente del estado presente del mismo. Es decir:

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_0 = x_0) = \quad (2)$$

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n)$$

Lo anterior coloca al análisis de fenómenos meteorológicos y en general de la naturaleza en la necesidad de ser analizados mediante mecanismos que posean esta peculiaridad de pérdida de memoria. En particular, el aumento en el número y severidad de los ciclones tropicales depende exclusivamente de la temperatura y condiciones del planeta en la actualidad.

Además de esta estructura matricial y propiedad de pérdida de memoria, toda cadena de Markov, posee características y propiedades en particular, que son relevantes para el análisis y estudio de cualquier tipo de suceso

estocástico. A continuación se mencionan algunas de las principales, como comunicación, recurrencia o transitoriedad y periodo.

Clases de comunicación

Una de las principales particularidades a considerar dentro de las cadenas de Markov, es la comunicación, dos o más estados pertenecen a una clase de comunicación si existe la probabilidad de acceder de un estado al otro en algún número de pasos. La importancia de esta propiedad radica en el hecho de que si un estado posee alguna de las características que a continuación se detallan, todos los demás estados dentro de la clase tendrán la misma propiedad.

Periodo

El periodo es el máximo común divisor del número de pasos con los cuales un proceso se desplaza de un estado a ese mismo sitio. Esta característica es propiedad de clase.

Recurrencia y transitoriedad

La característica de recurrencia y transitoriedad de los estados, también es propiedad de clase. La propiedad de recurrencia y transitoriedad tiene una trascendencia particular en el análisis de las cadenas de Markov, matemáticamente expresa que un estado es recurrente si con probabilidad de 1 se retorna a ese mismo estado. Y si por el contrario el retorno a ese mismo estado es inferior a 1, se considera que es transitorio. No obstante, dentro del contexto de la investigación, la recurrencia implicaría que una vez que se ha transitado por un ciclón o huracán de alguna categoría, es casi seguro que se volverá a observar un fenómeno natural de dicha magnitud. Y por el contrario, si algún ciclón tropical tuviera la característica de ser un estado transitorio, no sería seguro que volviera a observarse una precipitación con esas características.

Ecuación de Chapman-Kolmogorov

El modelo de transición de Chapman-Kolmogorov desarrolla la probabilidad de que un estado i transite a un estado j , considerando todas las posibles trayectorias intermedias en la evolución del fenómeno aleatorio.

Dados los números n y $m \geq 0$, la ecuación de Chapman-Kolmogorov, desarrolla la probabilidad de transición del estado i al estado j en “ $n+m$ ” número de pasos es:

$$P_{ij}^{n+m} = \sum_k P_{ik}^n P_{kj}^m, \text{ para todo } i \text{ y } j \quad (3)$$

Estacionariedad y Comportamiento límite

En toda matriz Markoviana es importante analizar si posee estabilidad a corto y mediano plazo, y si este comportamiento límite coincide con la distribución estacionaria. Cada cadena puede tener una única distribución estacionaria, no tener o tener una infinidad, en cuyos casos esto no serviría para poder hacer predicciones a mediano plazo. Para que cada cadena posea esta distribución estacionaria, todos sus estados deben ser recurrentes, debe ser finita y todos los estados deben estar conectados.

Para hallar esta distribución estacionaria debe resolverse el siguiente sistema de ecuaciones.

$$(u_0, u_1, u_2, \dots, u_n) * \begin{bmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_n)$$

donde: $\sum u_i = 1$ y para todo $u_i \geq 0$

La solución a este sistema de ecuaciones es la distribución estacionaria, si no existiera es que no posee un comportamiento estable.

Tiempo medio de recurrencia

Toda cadena de Markov irreducible, recurrente y con un número finito de estados tiene una única distribución estacionaria, a partir de la cual puede definirse el tiempo medio de recurrencia del proceso de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{1}{u_i}, \text{ donde } i = 0, 1, \dots, n \quad (4)$$

Se sabe que u_i es la distribución estacionaria de cada estado recurrente, en general en los estados transitorios este valor sería igual a cero, puesto que a largo plazo no se espera un eventual retorno, τ es el número de pasos en promedio para regresar a cada estado.

Escala de intensidad Saffir-Simpson

Fue desarrollada en el año 1970 por Robert Simpson, Director del Centro Nacional de Huracanes, y Herbert Saffir, ingeniero consultor en el condado de

Dade, Florida, considerando la velocidad del viento, potencial de destrucción costera, lluvia, inundaciones y marejadas ciclónicas; la intensidad de un huracán se clasifica en una escala del 1 al 5 llamada escala de Saffir-Simpson (Rakhecha y Singh, 2009). Existen otras categorías que no consideran la

Tabla 1. Etapas de transición de los ciclones tropicales
(Dentro y fuera de la escala de intensidad Saffir-Simpson)

Etapas de transición de un ciclón tropical			
Etapas		Vientos máximos (km/h)	Características de las etapas
1.- Perturbación tropical			Inestabilidad atmosférica asociada a la existencia de un área de baja presión
2.- Depresión tropical		menor o igual 62	Vientos se incrementan en la superficie producto de la existencia de una zona de baja presión.
3.- Tormenta tropical*		63-118	Las nubes se distribuyen en forma de espiral.
Escala Saffir-Simpson			
	Categoría	Vientos Máximos (km/h)	Características de posibles daños materiales
4.- Huracán	I	119 - 153	Árboles pequeños caídos; daños al tendido eléctrico.
	II	154 - 177	Categoría I + Daño en tejados, puertas y ventanas; desprendimiento de árboles.
	III	178 - 208	Categoría II + Grietas en construcciones.
	IV	209 - 251	Categoría III + Desprendimiento de techos en viviendas.
	V	Mayor a 252	Categoría IV + Daño muy severo y extenso en ventanas y puertas. Falla total de techos en muchas residencias y en construcciones industriales.
* Cuando un ciclón alcanza esta categoría se le asigna un nombre preestablecido por la Organización Meteorológica Mundial			

Fuente: elaboración con información de CONAGUA (2020).

escala Saffir-Simpson, ya que a partir de que un ciclón tropical supera la categoría de tormenta tropical es cuando se considera Huracán.

Categorías dentro y fuera de la escala de intensidad Saffir-Simpson

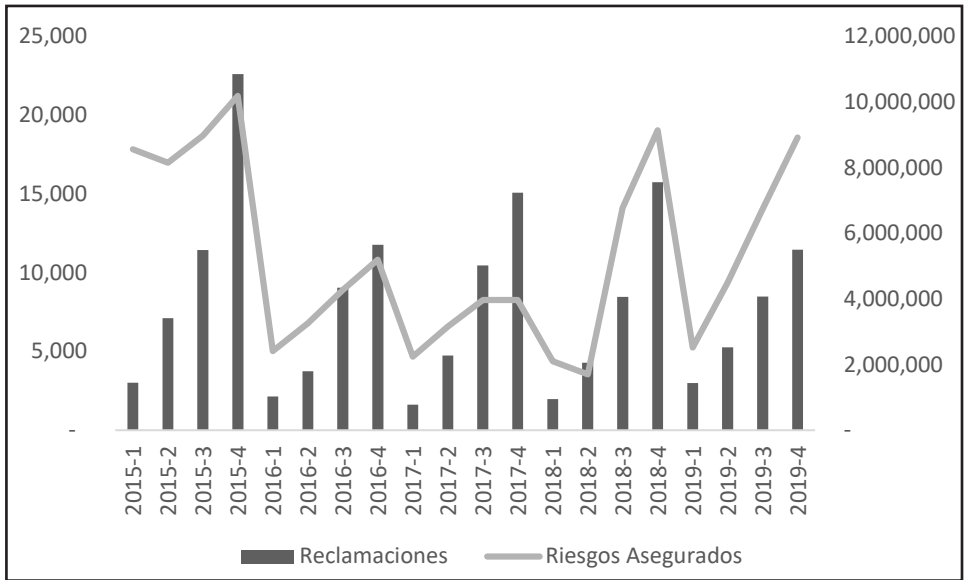
Los ciclones tropicales evolucionan entre diversas etapas dependiendo del grado de intensidad del mismo, esa transición a futuro depende únicamente del estado presente del ciclón y de su forma de evolución a través del tiempo; razón por la cual se propone en esta investigación el uso de la metodología de procesos estocásticos, en particular cadenas de Markov, para su modelación. Una vez que una tormenta tropical aumenta en intensidad a la etapa de Huracán, puede medirse en escala Saffir-Simpson.

3. Evidencia empírica

En los últimos años se ha observado un incremento considerable en el número de riesgos asegurados y unidades expuestas a fenómenos hidrometeorológicos. Es importante para el cálculo de primas y reservas en esta cobertura de protección patrimonial considerar la ubicación, zona de riesgo, así como las proyecciones hidrometeorológicas del servicio meteorológico nacional. Por esta razón, el propósito de esta investigación es proponer una herramienta alternativa a los modelos paramétricos que se utilizan actualmente para el cálculo de este tipo de riesgos. Las cadenas de Markov incorporan una metodología flexible, sin la necesidad de mucha información y considerando la ocurrencia de los eventos (frecuencias) en el presente, para la posterior predicción de eventos futuros. En la Gráfica 1, se observa el comportamiento del número de reclamaciones así como de riesgos asegurados de forma trimestral durante el período de análisis; cabe resaltar que es en el último semestre del año donde ocurren más reclamaciones.

En la Tabla 2 y Gráfica 2 se observa el número de siniestros ocurridos por fenómenos hidrometeorológicos, así como las sumas aseguradas, primas emitidas y costos de los siniestros por tipo de póliza o multipóliza en seguros directos. Es evidente que en el caso de póliza directa hay una tendencia creciente en los últimos años, al existir un incremento del año 2015 de 207 siniestros a 798 en 2018. Cabe destacar que en 2015, es el año en el que hubo más siniestros en la categoría de multipóliza con 13,101; ese año 4 ciclones golpearon las costas de México (por el Pacífico) de un total de 34 (en ambos océanos). Por otra parte, en el año 2018, 10 ciclones impactaron el país (8 por el Pacífico y 2 por el Atlántico), generando un costo de siniestros por \$ 4,318,813,868.00,

Gráfica 1. Comportamiento histórico del número de reclamaciones y riesgos asegurados



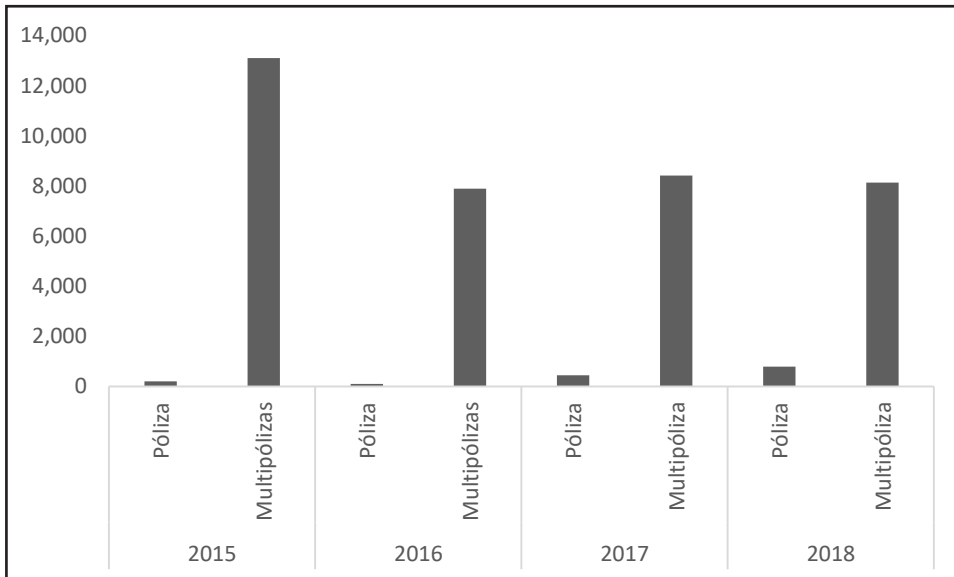
Fuente: elaboración propia con información de CNSF (2020)

Tabla 2. Seguro directo de daños por fenómenos hidrometeorológicos

Año	Tipo	Número de Pólizas en vigor	Suma asegurada	Prima emitida	Número de siniestros	Costo de siniestros
2018	Póliza	63369.00	\$ 293,282,006,092	\$ 913,080,621	798	\$ 391,263,266
	Multi	962978.00	\$ 20,104,230,066,618	\$9,952,236,710	8,140	\$4,318,813,868
2017	Póliza	62440.00	\$ 809,337,521,913	\$1,694,076,400	450	\$ 310,923,088
	Multi	877439.00	\$ 19,759,690,406,972	\$9,176,591,458	8,415	\$3,674,986,899
2016	Póliza	17,475	\$ 696,848,666,679	\$1,151,693,793	106	\$1,125,504,409
	Multi	871,294	\$ 26,566,636,879,703	\$8,032,566,400	7,893	\$2,036,327,147
2015	Póliza	13,551	\$ 361,633,686,089	\$ 954,635,199	207	\$1,236,459,690
	Multi	881,033	\$ 26,778,853,419,297	\$8,527,092,764	13,101	-\$ 114,841,221

Fuente: elaboración propia con información de CNSF (2020).

Gráfica 2. Número de siniestros por fenómenos Hidrometeorológicos



Fuente: elaboración propia con información de CNSF (2020).

el más alto registrado en los últimos 5 años. Por esta razón, el análisis de riesgos que influyan en el cálculo de primas o reservas para seguros de pérdidas patrimoniales es trascendente en la administración de riesgos actuariales. En la CIRCULAR S-10.1.11 de Seguros de huracán y/u otros riesgos hidrometeorológicos y el *Diario Oficial de la Federación* se especifican las bases técnicas para el cálculo de la siniestralidad y exposición a los siniestros (basados en estimaciones del Servicio Meteorológico Nacional). No obstante, en la propuesta de esta investigación se considera una metodología estocástica basada únicamente en las frecuencias observadas durante el período de tiempo de 2015-2019, etapa más calurosa jamás registrada en el mundo según la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

A partir de los reportes de temporada de ciclones tropicales de la *CONAGUA (2015-2019)* y *Servicio Meteorológico Nacional* en México se analizaron los ciclones tropicales en el océano Pacífico y océano Atlántico, durante los años 2015 al 2019, de donde se obtuvieron 193 ciclones tropicales. Es importante puntualizar que se tomó en cuenta este periodo debido a que las estimaciones de la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization 2019*) consideran que en ese quinquenio hubo un incremento

Tabla 3. Histórico de ciclones tropicales en los océanos Pacífico y Atlántico

Año 2015		Año 2016	
Total ciclones tropicales: 34		Total ciclones tropicales: 38	
océano Pacífico	océano Atlántico	océano Pacífico	océano Atlántico
22	12	22	16
Año 2017		Año 2018	
Total ciclones tropicales: 39		Total ciclones tropicales: 41	
océano Pacífico	océano Atlántico	océano Pacífico	océano Atlántico
20	19	25	16
	Año 2019		
	Total ciclones tropicales: 41		
	océano Pacífico	océano Atlántico	
	21	20	

Fuente: elaboración propia con información de CONAGUA (2015-2019).

sustancial en la temperatura del planeta, y como se ha mencionado en apartados anteriores, esto repercute en todos los fenómenos hidrometeorológicos, así como en las pérdidas económicas generadas por los mismos.

Puede observarse en la tabla anterior un incremento considerable en los últimos años en el número de ciclones tropicales en ambos océanos, al comenzar en 34 en el año 2015 y terminar en 41 en el 2019. En particular en el océano Atlántico se presentó una mayor actividad de estos fenómenos, iniciando el 2015 con 12 y concluyendo el 2019 con 20, en comparación al océano Pacífico, que ha presentado un comportamiento relativamente estable con 22 ciclones en el año 2015 y 21 al término de 2019.

La categorización del nivel de intensidad de estos ciclones tropicales es: Depresión tropical (DT), Tormenta tropical (TT), y Huracán [H (I-V)], los cuales evolucionarán dependiendo de la escala de intensidad Saffir-Simpson. En los propósitos de esta investigación éste será el espacio de estados, a partir de los cuales, los fenómenos hidrometeorológicos migrarán dependiendo del nivel de intensidad.

De las tres categorías observadas en la Gráfica 1, los huracanes son los más costosos en términos económicos así como de lamentables pérdidas humanas, se debe ser consciente que estos fenómenos hidrometeorológicos

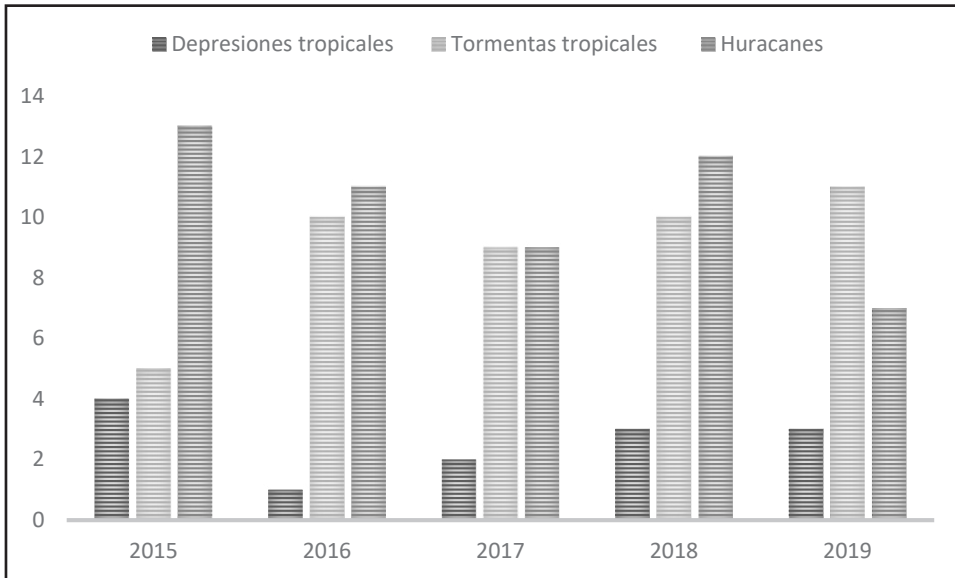
son cada vez más devastadores a consecuencia del cambio climático. Siendo ésta una externalidad negativa desde el punto de vista económico, existen diversas estimaciones sobre el costo económico que el cambio climático conlleva; por ejemplo, en CEPAL (2015) podemos observar que para el año

Tabla 4. Ciclones tropicales registrados en el océano Pacífico (2015-2019)

Ciclones tropicales océano Pacífico					
Año	2015	2016	2017	2018	2019
Depresiones tropicales	4	1	2	3	3
Tormentas tropicales	5	10	9	10	11
Huracanes	13	11	9	12	7
Total	22	22	20	25	21
Ciclones que impactaron en México:	4	3	4	8	4

Fuente: elaboración propia con información CONAGUA (2015-2019).

Gráfica 3. Comportamiento ciclones tropicales en el océano Pacífico (2015-2019)



Fuente: elaboración propia con información CONAGUA (2015-2019).

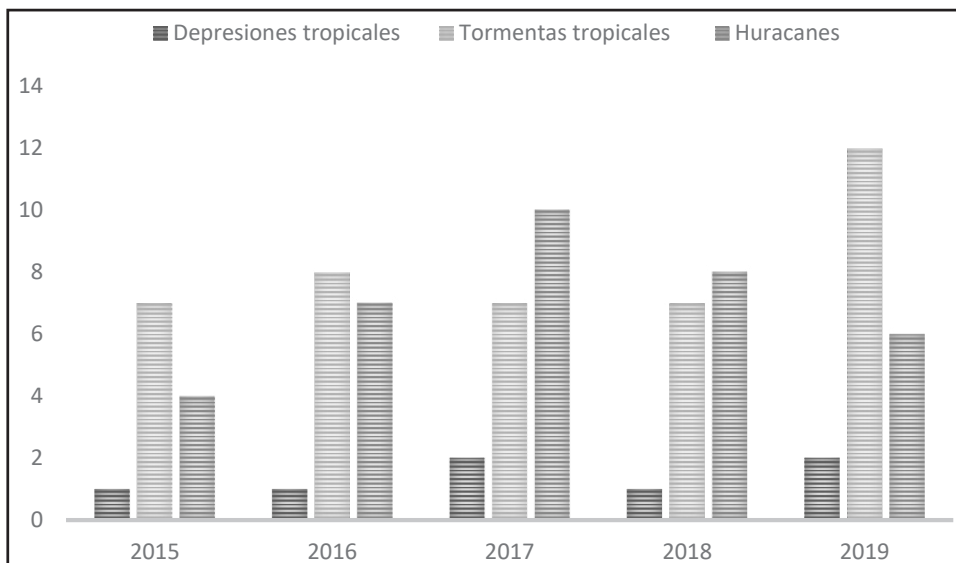
2050 el costo para América Latina y el Caribe en términos del PIB regional se pronostica que oscilará entre el 1.5% y el 5%. Entre las variables que afectarán la región dentro del marco del cambio climático están los huracanes, los cuales, según las proyecciones para el siglo XXI modificarán su frecuencia e intensidad en todo el planeta. Las principales afectaciones producidas por los ciclones tropicales se concentran en afectaciones al suministro de electricidad, servicios de telecomunicaciones y banca, caminos, puentes, casas,

Tabla 5. Ciclones tropicales registrados en el océano Atlántico (2015-2019)

Ciclones tropicales océano Atlántico					
Año	2015	2016	2017	2018	2019
Depresiones tropicales	1	1	2	1	2
Tormentas tropicales	7	8	7	7	12
Huracanes	4	7	10	8	6
Total	12	16	19	16	20
Ciclones que impactaron en México:	0	3	2	2	1

Fuente: elaboración propia con información CONAGUA (2015-2019)

Gráfica 4. Comportamiento ciclones tropicales en el océano Atlántico (2015-2019)



Fuente: elaboración propia con información CONAGUA (2015-2019).

escuelas, hospitales, puertos, y aeropuertos; además de provocar una serie de procesos migratorios de las poblaciones afectadas, teniendo consecuencias a largo plazo, ocasionadas por el impacto de estos fenómenos climáticos extremos.

En el año 2017, el Huracán María, uno de los más devastadores de ese año, impactó las Islas Vírgenes de Estados Unidos y la isla de Puerto Rico provocando procesos migratorios desde Puerto Rico hacia Estados Unidos, producto de las condiciones de pobreza en que se encuentra la isla, estos fenómenos sociales suceden cuando el Estado no tiene la capacidad de garantizar una seguridad social a la población como es el caso de México.

En la publicación “Olas de Choque” del Banco Mundial, Hallegatte *et al.* (2015) realiza un pronóstico desalentador de las consecuencias del cambio climático, señalando que el número de personas que podrían llegar a la situación de pobreza extrema, en adición a los que en ese año se encontraban en esta situación al año 2030 es de 100 millones de personas.

Matrices Markovianas

Océano Pacífico

Toda cadena de Markov irreducible, recurrente, aperiódica y finita tiene una única distribución estacionaria (Ross, 2002). Esta distribución muestra el comportamiento a mediano-largo plazo conforme al paso del tiempo.

Tabla 6. Estimación por máxima verosimilitud de la matriz Markoviana a partir de los datos observados de los ciclones tropicales en el océano Pacífico (2015-2019)

Matriz de transición (frecuencias observadas)							
Ciclones tropicales (2015-2019)							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0	2	2	0	4	0	4
H1	2	1	1	2	4	0	5
H2	1	2	1	1	0	0	2
H3	1	1	0	0	1	0	3
H4	1	3	1	0	4	1	12
H5	0	0	0	0	0	0	2
TT	8	6	2	3	8	1	17

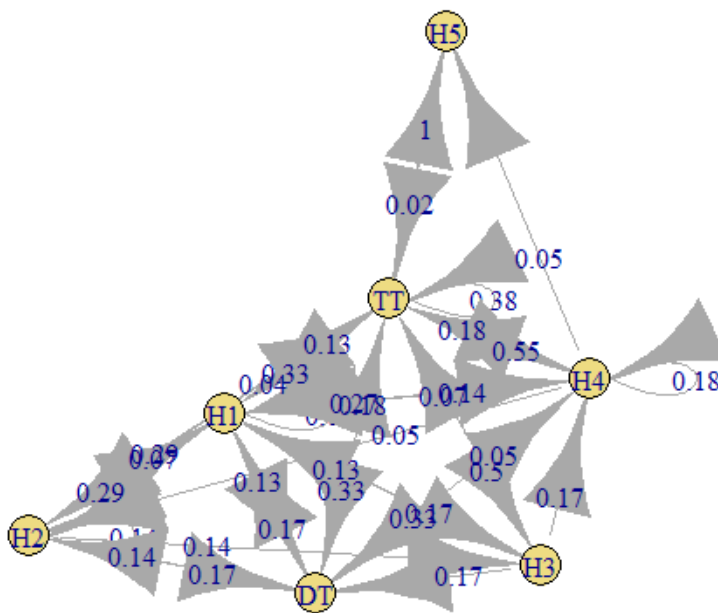
Matriz Markoviana (2015-2019)							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.000	0.167	0.167	0.000	0.333	0.000	0.333
H1	0.133	0.067	0.067	0.133	0.267	0.000	0.333
H2	0.143	0.286	0.143	0.143	0.000	0.000	0.286
H3	0.167	0.167	0.000	0.000	0.167	0.000	0.500
H4	0.045	0.136	0.045	0.000	0.182	0.045	0.545
H5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
TT	0.178	0.133	0.044	0.067	0.178	0.022	0.378

Error estándar de la estimación							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.000	0.118	0.118	0.000	0.167	0.000	0.167
H1	0.094	0.067	0.067	0.094	0.133	0.000	0.149
H2	0.143	0.202	0.143	0.143	0.000	0.000	0.202
H3	0.167	0.167	0.000	0.000	0.167	0.000	0.289
H4	0.045	0.079	0.045	0.000	0.091	0.045	0.157
H5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.707
TT	0.063	0.054	0.031	0.038	0.063	0.022	0.092

Límite inferior de la estimación							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.000	0.059
H1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047	0.000	0.088
H2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
H3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
H4	0.000	0.007	0.000	0.000	0.032	0.000	0.286
H5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TT	0.074	0.044	0.000	0.003	0.074	0.000	0.227

Límite superior de la estimación							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.000	0.361	0.361	0.000	0.607	0.000	0.607
H1	0.288	0.176	0.176	0.288	0.486	0.000	0.579
H2	0.378	0.618	0.378	0.378	0.000	0.000	0.618
H3	0.441	0.441	0.000	0.000	0.441	0.000	0.975
H4	0.120	0.266	0.120	0.000	0.331	0.120	0.804
H5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
TT	0.281	0.223	0.096	0.130	0.281	0.059	0.528

Diagrama 1. Transición Markoviana Océano Pacífico (2015-2019)



Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Tiempo medio de recurrencia Matriz Markoviana Océano Pacífico

Distribución estacionaria océano Pacífico						
DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
Tiempo medio de recurrencia.						
DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
8.419	7.242	15.29	18.14	5.158	55.74	2.435

Fuente: elaboración propia

Como resultado de este comportamiento límite, se observa que hay una probabilidad de 0.411 de presentarse tormenta tropical en el océano Pacífico para este año 2020 (la distribución estacionaria representa el comportamiento límite el cual obtiene la cadena en el año 2020), y 0.47 de ocurrir un huracán dentro de las categorías 1-5. Lo anterior cobra relevancia en el sentido de la necesidad de tomar previsiones de cobertura para este posible hecho en la región. A partir de esta distribución estacionaria y la matriz Markoviana se realizan 110 simulaciones,¹ encontrando que existe una alta probabilidad de ocurrencia de algún huracán de categoría [1,5] y tormentas tropicales con un 40%.

Realizando la proyección de la cadena de Markov para 2020 se obtiene el comportamiento límite (coincidente con la distribución estacionaria), y a partir de estos resultados se consideran 2 escenarios, uno tomando en cuenta la posibilidad de que sucedan 22 ciclones tropicales (lo anterior debido al

Tabla 8. Simulación océano Pacífico

Proporción de ciclones generados a partir de la simulación en el océano Pacífico							
DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT	Total
10.9%	18.2%	10.0%	6.4%	13.6%	0.9%	40.0%	100%

Fuente: elaboración propia.

¹ En la simulación se generó este número particular de ciclones tropicales, ya que en el océano Pacífico en el periodo de observación 2015-2019, ocurrieron un total de 110 ciclones.

Tabla 9. Proyección Markoviana de ciclones Tropicales para el 2020 en el océano Pacífico

Proyección Markoviana océano Pacífico (2020)							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
H1	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
H2	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
H3	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
H4	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
H5	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411
TT	0.119	0.138	0.065	0.055	0.194	0.018	0.411

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Pronóstico ciclones Tropicales 2020, océano Pacífico CONAGUA – Estimación Markoviana

	Pronóstico 2020	Pronóstico 2020
	CONAGUA	Estimación Markoviana (Considerando 22 ciclones tropicales)
Tormentas tropicales	[7,8]	9.04
Huracanes 1 y 2	[4-5]	4.48V
Huracanes 3, 4 o 5	[4-5]	5.87
Total	[15,18]	19.39
	Pronóstico 2020	Pronóstico 2020
	CONAGUA	Estimación Markoviana (Considerando 18 ciclones tropicales)
Tormentas tropicales	[7,8]	7.39
Huracanes 1 y 2	[4-5]	3.66
Huracanes 3, 4 o 5	[4-5]	4.81
Total	[15,18]	15.86

Fuente: elaboración propia con información de CONAGUA (2020).

promedio de ocurrencia de los últimos 5 años) y el otro escenario tomando en cuenta el límite superior de la estimación de CONAGUA, en ambos casos, las estimaciones coinciden con las proyecciones de esta institución.

Océano Atlántico

Nuevamente esta cadena Markov es irreducible, recurrente, aperiódica y finita, por lo tanto, tiene una única distribución estacionaria (Ross, 2002). Esta distribución muestra el comportamiento a mediano-largo plazo conforme transcurre el tiempo, el número e intensidad de ciclones en el océano Atlántico (véase Tabla 12).

Tabla 11. Estimación por máxima verosimilitud de la matriz Markoviana a partir de los datos observados de los ciclones tropicales en el océano Atlántico (2015-2019)

Matriz de transición (frecuencias observadas)							
Ciclones Tropicales (2015-2019)							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0	1	0	0	0	1	5
H1	1	1	2	1	1	0	6
H2	0	1	1	1	1	0	4
H3	1	0	0	0	0	1	2
H4	1	1	2	0	0	0	3
H5	0	1	0	0	2	0	1
TT	4	7	3	2	3	2	19

Matriz Markoviana (2015-2019)							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.000	0.143	0.000	0.000	0.000	0.143	0.714
H1	0.083	0.083	0.167	0.083	0.083	0.000	0.500
H2	0.000	0.125	0.125	0.125	0.125	0.000	0.500
H3	0.250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.500
H4	0.143	0.143	0.286	0.000	0.000	0.000	0.429
H5	0.000	0.250	0.000	0.000	0.500	0.000	0.250
TT	0.100	0.175	0.075	0.050	0.075	0.050	0.475

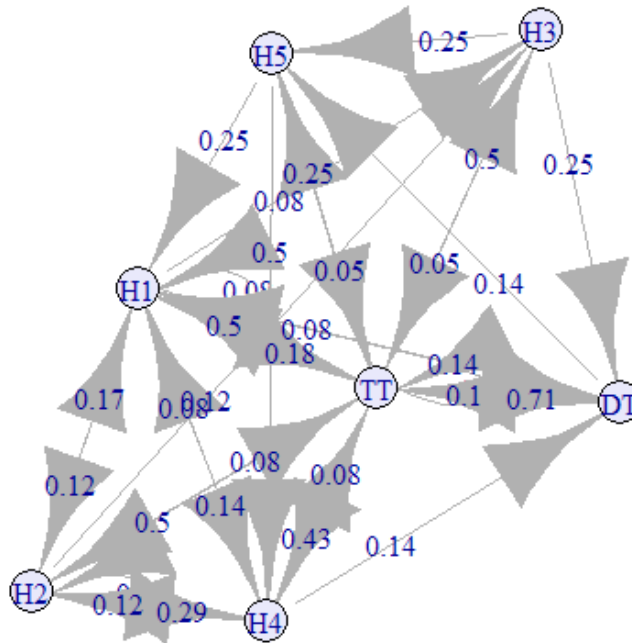
Error estándar de la estimación							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.000	0.143	0.000	0.000	0.000	0.143	0.319
H1	0.083	0.083	0.118	0.083	0.083	0.000	0.204
H2	0.000	0.125	0.125	0.125	0.125	0.000	0.250
H3	0.250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.354
H4	0.143	0.143	0.202	0.000	0.000	0.000	0.247
H5	0.000	0.250	0.000	0.000	0.354	0.000	0.250
TT	0.050	0.066	0.043	0.035	0.043	0.035	0.109

Límite inferior de la estimación							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0	0	0	0	0	0	0.19
H1	0	0	0	0	0	0	0.16
H2	0	0	0	0	0	0	0.09
H3	0	0	0	0	0	0	0
H4	0	0	0	0	0	0	0.02
H5	0	0	0	0	0	0	0
TT	0.02	0.07	0	0	0	0	0.3

Límite superior de la estimación							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0	0.38	0	0	0	0.38	1
H1	0.22	0.22	0.36	0.22	0.22	0	0.84
H2	0	0.33	0.33	0.33	0.33	0	0.91
H3	0.66	0	0	0	0	0.66	1
H4	0.38	0.38	0.62	0	0	0	0.84
H5	0	0.66	0	0	1	0	0.66
TT	0.18	0.28	0.15	0.11	0.15	0.11	0.65

Fuente: elaboración propia.

Diagrama 2. Transición Markoviana ciclones océano Atlántico (2015-2019)



Fuente: elaboración propia.

De igual forma, la cadena de Markov al ser recurrente positiva (irreducible, aperiódica y finita), obtiene el comportamiento estacionario, que en este caso representa que existe una probabilidad de 0.427 de que se presente algún ciclón de categoría [1, 5] y 0.488 de tormenta tropical. En la Tabla 13 se realizan 83² simulaciones de futuros ciclones a partir de la matriz de transición, y la distribución estacionaria implícita, obteniendo los resultados que se presentan.

En el caso del océano Atlántico, se realizaron dos pronósticos en función de un escenario de 17 ciclones para el 2020, ya que éste es el número promedio de los últimos 5 años y otro pronóstico considerando el límite superior de la estimación de CONAGUA de 19, en ambos casos las estimaciones hechas con cadenas de Markov son muy similares a las del organismo.

² Este número de ciclones se simuló debido a que en el periodo 2015-2019 hubo un total de 83 ciclones tropicales en el océano Atlántico.

Tabla 12. Tiempo medio de recurrencia Matriz de transición océano Atlántico

Distribución estacionaria océano Atlántico						
Probabilidades						
DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
Tiempo medio de recurrencia						
DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
11.71	6.833	10.25	20.5	11.71	20.5	2.05

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Simulación océano Atlántico

Proporción de ciclones generados a partir de la simulación en el océano Atlántico							
DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT	Total
7.2%	22.9%	13.3%	3.6%	9.6%	2.4%	41.0%	100.0%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Proyección Markoviana de ciclones tropicales para el 2020 en el océano Atlántico

Proyección Markoviana Océano Atlántico (2020)							
	DT	H1	H2	H3	H4	H5	TT
DT	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
H1	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
H2	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
H3	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
H4	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
H5	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488
TT	0.085	0.146	0.098	0.049	0.085	0.049	0.488

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Pronostico Ciclones Tropicales 2020
Océano Atlántico
CONAGUA – Estimación Markoviana

	Pronóstico 2020 CONAGUA	Pronóstico 2020 Estimación Markoviana (Considerando 17 ciclones tropicales)
Tormentas tropicales	[8,10]	8.29
Huracanes 1 y 2	[4,5]	4.15
Huracanes 3, 4 o 5	[3,4]	3.11
Total	[15,19]	15.55

	Pronóstico 2020 CONAGUA	Pronóstico 2020 Estimación Markoviana (Considerando 19 ciclones tropicales)
Tormentas tropicales	[8,10]	9.27
Huracanes 1 y 2	[4,5]	4.63
Huracanes 3, 4 o 5	[3,4]	3.48
Total	[15,19]	17.38

Fuente: elaboración propia con información de CONAGUA (2020).

Conclusiones

Las consecuencias del cambio climático son una realidad, variaciones drásticas del clima provocan acontecimientos como inundaciones provenientes de huracanes cada vez más severos causando pérdidas millonarias en la infraestructura de las zonas costeras, en el interior del país e implicaciones en los mercados económicos. Por esta razón, el análisis de riesgos que influyan en el cálculo de primas o reservas para seguros de pérdidas patrimoniales es trascendente en la administración de riesgos actuariales. En la CIRCULAR S-10.1.11 de Seguros de huracán y/u otros

riesgos hidrometeorológicos y el *Diario Oficial de la Federación* se especifican las bases técnicas para el cálculo de la siniestralidad y exposición a los siniestros (basados en estimaciones del Servicio Meteorológico Nacional). No obstante, en la propuesta de esta investigación se consideró una metodología estocástica basada únicamente en las frecuencias observadas durante el período de tiempo de 2015-2019, la etapa más calurosa jamás registrada en el mundo según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), lo anterior para brindar una herramienta alternativa que incorpore flexibilidad, y la posibilidad de uso de forma regional para el análisis en la administración de riesgos hidrometeorológicos dentro del cálculo actuarial. Las estimaciones matemáticas obtenidas en esta investigación se encuentran muy cercanas a las generadas por la Comisión Nacional del Agua para el año 2020, se sugiere el uso de esta metodología para estimaciones a corto plazo y cuando se disponga de poca información, de igual forma se consideró la generación de intervalos de confianza para cada estimación.

Cada vez son más comunes los cambios de clima hacia eventos climatológicos extremos, afectando a todo el mundo, provocado posiblemente por un sistema económico en donde el uso de combustibles fósiles es una constatación. El desarrollo económico que han tenido principalmente los países del norte debería ser medido tomando en cuenta las consecuencias que ello produce, una de estas consecuencias es el efecto retardado o diferido del clima, dado que las consecuencias pueden tardar en manifestarse, lo que da una falsa ilusión de desarrollo al no ser tomadas en cuenta. Es un hecho que sin la presencia de un clima estable, se presentarán dificultades que obstaculizarán el desarrollo de una economía próspera. No obstante, el modelo económico que ha impulsado el desarrollo de los países del Norte, principalmente basado en gran medida en el aprovechamiento de los recursos energéticos para sus industrias, además del intercambio comercial global sin restricciones global impulsado por los mismos, parece ser no sostenible a perpetuidad a causa de los daños que han causado al medio ambiente.

En la investigación se analizaron de manera independiente los océanos Atlántico y Pacífico, para generar el comportamiento de éstos en el corto plazo. Para el océano Pacífico puede observarse que hay probabilidad a corto plazo de la generación de huracanes con un 0.47 y 0.411 de tormentas tropicales. Por otra parte, para el océano Atlántico, en la distribución estacionaria hay una probabilidad de 0.427 que se presente un huracán en cualquiera de las 5 categorías y 0.488 de tormentas tropicales.

Referencias bibliográficas

- Asaduzzaman, M., y Latif, A. M. (2014). "A Parametric Markov Renewal Model for Predicting Tropical Cyclones in Bangladesh. *Natural hazards*", vol. 73, núm. 2, pp. 597-612.
- Asaduzzaman, M., y MahubLatif, A. H. M. (2012). "A Markov Renewal Model for Predicting Tropical Cyclones in Bangladesh". Dr. M. Abul Basher Mian, pp. 391-397.
- Basharin, G. P., Langville, A. N., y Naumov, V. A. (2004). "The Life and Work of AA Markov". *Linear Algebra and its Applications*, núm. 386, pp. 3-26.
- Belasen, A. R., y Polachek, S. W. (2008). "How Hurricanes affect Wages and Employment in Local Labor Markets". *American Economic Review*, vol. 98 núm. 2, pp. 49-53.
- Burrus Jr, R. T., Dumas, C. F., Farrell, C. H., y Hall Jr, W. W. (2002). "Impact of Low-Intensity Hurricanes on Regional Economic Activity". *Natural Hazards Review*, vol. 3 núm. 3, pp. 118-125.
- Camargo, S. J., Barnston, A. G., Klotzbach, P. J., y Landsea, C. W. (2007). Predicciones estacionales de ciclones tropicales.
- CEPAL, N. (2015). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible. CEPAL.
- Chaves, F. J. S., y Martínez, E. J. A. (2011). "Impacto de los ciclones tropicales del Atlántico en América Central 1868-1869". *Diálogos Revista Electrónica*, vol. 12, núm. 1, pp. 81-100.
- Chu, P. S., y Zhao, X. (2007). "A Bayesian Regression Approach for Predicting Seasonal Tropical Cyclone Activity over the Central North Pacific". *Journal of Climate*, vol. 20, núm. 15, pp. 4002-4013.
- CNSF (2020). Información consolidada del sector asegurador. [En línea]. Recuperado el 2 de Julio 2020, <https://www.cnsf.gob.mx/EntidadesSupervisadas/InstitucionesSociedadesMutualistas/Paginas/InformacionConsolidada.aspx>
- CONAGUA. (2015). Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2015. México: Cirilo Bravo Lujano. Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología-Subgerencia de Pronóstico Meteorológico.
- CONAGUA. (2016). Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2016. México: Cirilo Bravo Lujano. Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología-Subgerencia de Pronóstico Meteorológico.

- CONAGUA. (2017). Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2017. México: Cirilo Bravo Lujano. Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología-Subgerencia de Pronóstico Meteorológico.
- CONAGUA (2018). Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2018. México: Cirilo Bravo Lujano. Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología-Subgerencia de Pronóstico Meteorológico.
- CONAGUA (2019). "Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2019". México: Cirilo Bravo Lujano. Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología-Subgerencia de Pronóstico Meteorológico.
- CONAGUA (2020). "Etapas de evolución ciclones tropicales". Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología-Subgerencia de Pronóstico Meteorológico. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/etapas-de-evolucion>
- Diario Oficial de la Federación.* (2007). CIRCULAR S-10.1.11 Seguro de huracán y/u otros riesgos hidrometeorológicos. Secretaría de Gobernación. México. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5003857&fecha=17/10/2007. Consultado en mayo de 2020.
- Enfedaque, N. D., y Martínez, J. M. D. (2014). *El impacto económico de los desastres naturales*. eXtoikos, (15), 99-101.
- Frank, W. M., y Young, G. S. (2007). "The Interannual Variability of Tropical Cyclones". *Monthly Weather Review*, vol. 135, núm. 10, pp. 3587-3598.
- Gabriel, K.R. y Neumann, J., (1962). A Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrences at Tel Aviv. *Quart.J.royal Met.Soc.* núm. 88, pp. 90-95.
- Hallegatte, S., Bangalore, M., Bonzanigo, L., Fay, M., Kane, T., Narloch, U., Rozenberg, J., Treguer, D. y Vogt-Schilb, A. (2015). "Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty". The World Bank.
- Hori, M., y Schafer, M. J. (2010). "Social Costs of Displacement in Louisiana after Hurricanes Katrina and Rita". *Population and environment*, vol. 31núm. 1-3, pp. 64-86.
- Hsiang, S. M., y Jina, A. S. (2014). "The Causal Effect of Environmental Catastrophe on Long-run Economic Growth: Evidence from 6,700 cyclones (No. w20352)". National Bureau of Economic Research.

- Jing, R., y Lin, N. (2020). "An Environment-dependent Probabilistic Tropical Cyclone Model". *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 12, núm. 3, e2019MS001975.
- Jovel, J. R. (1989). "Los desastres naturales y su incidencia económico-social". *Revista de la CEPAL*.
- Lennartsson, J., Baxevani, A., y Chen, D. (2008). "Modelling Precipitation in Sweden using Multiple Step Markov Chains and a Composite Model". *Journal of hydrology*, vol. 363 núm. 1-4, pp. 42-59.
- Mangaraj, A. K., Sahoo, L. N., y Sukla, M. K. (2013). "A Markov Chain Analysis of Daily Rainfall Occurrence at Western Orissa of India". *Journal of Reliability and Statistical Studies*, vol. 6, núm. 1, pp. 77-86.
- Markov, A.A. (1906). "Extension of the Limit Theorems of Probability Theory to a Sum of Variables Connected in a Chain", Versión original en ruso, reimpresso en Appendix B, de R. Howard, *Dynamic Probabilistic Systems, volume 1: Markov Chains*, John Wiley and Sons, 1971.
- Ortiz, W. R., y Ruiz, S. G. (2012). "Simulación y pronóstico de lluvias: una aplicación al Estado de Tlaxcala, México". *Geofísica Internacional*, vol. 30, núm. 3.
- Rakhecha, P., y Singh, V. P. (2009). "Applied Hydrometeorology". *Springer Science & Business Media*.
- Roberts, R. A. J. (2005). "Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación". Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-y5996s.pdf>.
- Ross, S. M. (2002). "Probability Models for Computer Science". San Diego: Harcourt Academic Press.
- Tettey, M., Oduro, F. T., Adedia, D., y Abaye, D. A. (2017). "Markov Chain Analysis of the Rainfall Patterns of Five Geographical Locations in the South Eastern Coast of Ghana". *Earth Perspectives*, vol. 4, nú. 1, p. 6.
- Von Hilgers, P., y Langville, A. N. (2006, June). "The Five Greatest Applications of Markov chains. In Proceedings of the Markov Anniversary Meeting". *Boston Press*, pp. 155-158.
- Vide, J. M. (1989). "Precipitaciones torrenciales en España". Norba: *Revista de geografía*, núm. 6, pp. 63-70.
- Wenner, M. D. (2005). "Los seguros agrícolas: evolución y perspectivas en América Latina y el Caribe". Documento de Trabajo RUR, 05-02.
- Wilks, D. S., y Wilby, R. L. (1999). "The Weather Generation Game: A Review of Stochastic Weather Models". *Progress in physical geography*, vol. 23, núm. 3, pp. 329-357.

Wooten, R. D., y Tsokos, C. P. (2008). "A Markovian Analysis of Hurricane Transitions". *Neural, Parallel and Scientific Computations*, vol. 16, núm. 1, p. 1.

World Meteorological Organization (WMO), 2019: The Global Climate in 2015–2019, [En línea]. Recuperado el 2 de Julio 2020. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21522#.XuuyNmgzbIV