



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

**CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS SOCIO URBANOS
CENTRO DE ESTUDIOS ESTRATÉGICOS PARA EL DESARROLLO
DOCTORADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN TERRITORIAL**



**DOCTORADO EN
GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN TERRITORIAL**

TESIS

“RIESGO ASOCIADO A LA LLUVIA EXTREMA EN EL ESTADO DE JALISCO EN EL PERIODO 1981-2018”

Que presenta para obtener el grado de
Doctor en Geografía y Ordenación Territorial
el estudiante:

**Ernesto Villate Garcia
Código: 216909831**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. Julio Cesar Morales Hernández
CuCosta-Universidad de Guadalajara**

CO-DIRECTOR

**Dra. Maria de Lourdes Romo Aguilar
COLEF- El Colegio de la Frontera Norte**

ZAPOPAN, JALISCO MÉXICO, DICIEMBRE 2023



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

**CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS SOCIO URBANOS
CENTRO DE ESTUDIOS ESTRATÉGICOS PARA EL DESARROLLO
DOCTORADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN TERRITORIAL**



**DOCTORADO EN
GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN TERRITORIAL**

TESIS

“RIESGO ASOCIADO A LA LLUVIA EXTREMA EN EL ESTADO DE JALISCO EN EL PERIODO 1981-2018”

Que presenta para obtener el grado de
Doctor en Geografía y Ordenación Territorial
el estudiante:

**Ernesto Villate Garcia
Código: 216909831**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. Julio Cesar Morales Hernández
CuCosta-Universidad de Guadalajara**

CO-DIRECTOR

**Dra. Maria de Lourdes Romo Aguilar
COLEF- El Colegio de la Frontera Norte**

ZAPOPAN, JALISCO MÉXICO, DICIEMBRE 2023

Índice Capitular

Índice de Figuras	5
Índice de tablas	7
Dedicatoria	8
Agradecimientos	8
Resumen.....	10
Abstract	10
Resumo.....	11
Introducción	12
Problema	14
Pregunta de Investigación:.....	15
Objetivos	16
Objetivo General:	16
Objetivos Específicos:.....	16
Hipótesis.....	16
Delimitación Espacial	16
Marco Teórico	18
1.1- Teorías dialéctico marxista y geografía de los riesgos	19
1.2- Riesgo	21
1.3- Peligro, Exposición y Vulnerabilidad	22
1.4- Precipitación extrema: máxima e intensa.....	26
1.5- Variabilidad climática	29
1.6- Gestión del riesgo	31
1.7- Estado del Arte.....	32
1.7.1- Distribución espacial y temporal.....	32
1.7.2- Patrones Atmosféricos.....	40
1.7.3- Oscilaciones Atmosféricas.....	42
2- Metodología y Técnicas de Investigación	47
2.1- Datos	48
2.1.1- CHIRPS.....	50
2.2- Períodos de retorno	53
2.3- Variabilidad climática	55
2.4- Distribución anual de precipitaciones.....	56

2.4.1- Máximo mensual.....	58
2.5- Exposición y Vulnerabilidad	59
3- Análisis Espacio-Temporal.....	63
3.1- Evaluación de las bases de datos.	63
3.1.1- Estaciones CONAGUA.....	63
3.1.2- Datos CHIRPS.....	64
3.2- Tendencia de la precipitación	73
3.2.1- Prueba de bondad de ajuste	76
3.2.2- Períodos de retorno	76
3.3- Temporal de lluvias en Jalisco.....	84
3.3.1- Inicio y fin	84
4- Análisis Integrador	92
4.1- Exposición	92
4.4.1- Configuración de niveles de exposición y peligro	95
4.4.2- Niveles de exposición.....	97
4.2- Vulnerabilidad	102
4.3- Riesgo	106
Discusiones.....	108
5.1- Debate conceptual.....	108
5.2- Fuentes de datos: Oportunidades y Retos.	109
5.3- La estadística y su interpretación.....	110
5.4- Concatenación teórica del riesgo	112
Conclusiones	114
Recomendaciones	117
Referencias.....	118

Índice de Figuras

Figura 1:Ubicación geográfica del Estado de Jalisco. Fuente: elaboración propia en base a cartografía del INEGI.	17
Figura 2:Anomalías de temperaturas en la superficie del mar. Las anomalías cálidas en la región ecuatorial del Pacífico se asocian con El Niño, mientras que las anomalías frías con La Niña. Tomado de la NOAA.....	31
Figura 3: Insumo para los instrumentos de gestión del riesgo. Los colores hacen referencia a los objetivos específicos.	48
Figura 4: Localización de las estaciones climatológicas pertenecientes a CONAGUA. Fuente: elaboración propia en base a cartografía del INEGI.....	49
Figura 5: Localización de las regiones del estado de Jalisco y sus estaciones representativas.	56
Figura 6:Anomalías diarias (a) y anomalías acumuladas (b) de precipitación para la estación “La Experiencia-14329” en el municipio Guadalajara.	58
Figura 7: Esquema de las configuraciones que combinan los niveles de exposición e incidencia.....	61
Figura 8: Comportamiento del BIAS para cada indicador. En cada caja, la línea roja es la mediana, los límites son los percentiles 25 y 75 y los bigotes se extienden hasta los valores extremos. Las cruces rojas representan outliers.....	65
Figura 9: Gráfico comparativo del RBIAS entre los cinco índices. La línea punteada indica el valor ideal.	66
Figura 10: Histograma y ajuste de curva del valor de RMSE (x) contra el número de estaciones (y).	67
Figura 11: Gráfico de dispersión con ajuste lineal para cada uno de los índices. En la ecuación de ajuste, y-estaciones in situ, x-CHIRPS.....	68
Figura 12: Gráfico de barras apiladas que muestran el comparativo entre los resultados de R2 de cada una de las estaciones y por cada índice de precipitación extrema. Las clases solo llegan al 0.8 debido a que el máximo absoluto fue de 0.69.....	69
Figura 13: Mapa de distribución espacial del coeficiente de determinación para el MR1... 70	70
Figura 14: Tendencia de los índices “Precipitación total”, “Precipitación diaria máxima anual” y “Total de casos anuales de lluvia extrema” en cada una de las 92 estaciones.	74
Figura 15: Distribución espacial de la tendencia de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas.	75
Figura 16: Gráfico con los porcentajes de estaciones con un R^2 en los rangos de la leyenda.....	76
Figura 17: Histograma de acumulados de precipitación para un Pr5.	77
Figura 18: Mapa Voronoi a. simple, b. desviación estándar.	78
Figura 19: Gráfico de tendencia espacial: X-longitud; Y-latitud; Z: valor de precipitación.	79
Figura 20: Semivariograma.	79

Figura 21: Distribución espacial de la precipitación máxima anual en 24 horas para un Pr5.	80
Figura 22: Espectro de frecuencias del índice ONI en el período 1981-2018.	82
Figura 23: Espectro de frecuencias de cada una de las estaciones representativas para cada región. Las bandas roja y azul indican rangos de frecuencias.	83
Figura 24: Inicio del temporal en el estado de Jalisco. 30- últimos cinco días de mayo, 31- primera péntada de junio, 32- segunda péntada de junio, 33- tercera péntada de junio, 34- cuarta péntada de junio. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 25: Final del temporal en el estado de Jalisco. 55- del 1 al 5 de octubre, 56- del 6 al 10 de octubre, 57- del 11 al 15 de octubre, 58- del 16 al 20 de octubre, 59- del 21 al 25 de octubre. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura 26: Distribución espacial del mes donde se produce el mayor acumulado anual en cinco días. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura 27: Desviación estándar (STD) del inicio de temporal. Los valores refieren a péntadas. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 28: Desviación estándar del final de temporal. Los valores refieren a péntadas. Fuente: Elaboración propia.	90
Figura 29: Desviación estándar del mes con máxima lluvia en cinco días. Los valores refieren a meses. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 30: Distribución del porcentaje de población del total del estado de Jalisco que presenta cada municipio.	93
Figura 31: Distribución de la densidad de población por km2 por municipios.	93
Figura 32: Distribución de la tasa de crecimiento de la población por municipios en el período 2010-2020. La tasa indica el crecimiento promedio entre cada uno de los años.	94
Figura 33: Combinación de los indicadores de exposición y porcentaje de población total, densidad de población y tasas de crecimiento, por municipios.	94
Figura 34: Composición de categorías de acuerdo con niveles altos y bajos de exposición y precipitación máxima anual en 24 horas para un período de retorno de cinco años (Pr5) por cada municipio.	96
Figura 35: Composición de categorías de acuerdo con niveles altos y bajos de exposición y tendencia de las precipitaciones máximas por cada municipio.	96
Figura 36: Exposición del porcentaje de población por municipio a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.	97
Figura 37: Exposición del porcentaje de población por municipio a la tendencia de lluvias máximas.	98
Figura 38: Exposición del porcentaje de densidad poblacional por municipio a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.	99
Figura 39: Exposición del porcentaje de densidad poblacional por municipio a la tendencia de lluvias máximas.	100
Figura 40: Exposición de la tasa de crecimiento poblacional por municipio a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.	100

Figura 41: Exposición de la tasa de crecimiento poblacional por municipio a la tendencia de lluvias máximas.	101
Figura 42: Exposición producto a la combinación del porcentaje poblacional, la densidad poblacional y la tasa de crecimiento poblacional, a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.	101
Figura 43: Exposición producto a la combinación del porcentaje poblacional, la densidad poblacional y la tasa de crecimiento poblacional, a la tendencia de lluvias máximas.	102
Figura 44: Porcentaje de la población menor de cinco años y mayor de 65 con respecto a total de cada municipio.	103
Figura 45: Porcentaje de personas con alguna discapacidad (visual, auditiva, motora y lingüística) con respecto al total de cada municipio.	104
Figura 46: Porcentaje de viviendas particulares habitadas (VPH) con piso de tierra, con respecto al total de cada municipio.	104
Figura 47: Porcentaje de viviendas particulares habitadas (VPH) sin ningún tipo de drenaje, con respecto al total de cada municipio.	105
Figura 48: Porcentaje de viviendas particulares habitadas (VPH) sin tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), con respecto al total de cada municipio.	105
Figura 49: Vulnerabilidad (incluyendo todos los indicadores seleccionados) a las precipitaciones extremas por municipio en el estado de Jalisco.	106
Figura 50: Distribución por municipios del riesgo asociado a las precipitaciones máximas anuales para un período de retorno de cinco años por municipio en Jalisco.	107
Figura 51: Distribución por municipios del riesgo asociado a la tendencia de las precipitaciones máximas por municipio en Jalisco.	107

Índice de tablas

Tabla 1: Índices de precipitación extrema seleccionados.	52
Tabla 2: Indicadores para identificar la exposición y la vulnerabilidad ante precipitaciones máximas.	60
Tabla 3: Período de estudio	64
Tabla 4: Regresión lineal múltiple.	70
Tabla 5: Distribución porcentual de la tendencia de precipitaciones en Jalisco	75
Tabla 6: Distribución de la exposición de acuerdo a las cuatro categorías establecidas.	95

Dedicatoria

A mi pelusita Ema, a quien tambien le dedicare mi vida

Agradecimientos

Esta investigación es el resultado de la colaboración entre varios colegas y amigos. Quisiera compartir mi agradecimiento a:

- Nuestra casa de estudios, la Universidad de Guadalajara, en específico al Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades.
- Los doctores Francisco Jalomo Aguirre y Jesús Rodríguez Rodríguez, coordinadores del programa de doctorado durante mi generación, por la adecuada planificación para culminar de manera exitosa el proceso.
- Mi asesor y amigo, el Dr. Julio César Morales. Además de sus aportes científicos, fue clave la confianza depositada en mí, así como su visión práctica en cada obstáculo.
- Al Dr. Omar, desde la concepción de la investigación hasta el punto final tuvo un impacto permanente. Un verdadero lujo tenerlo a mi lado, garantía de éxito, segundo padre.
- A las doctoras María de Lourdes Romo Aguilar (co-directora) y Rocío Castillo Ajá y al Dr. Heriberto Cruz Solis, por insertarme en el mundo de la Geografía de los Riesgos.
- A los compañeros de generación, un verdadero equipo multidisciplinario. En especial a mi socio y hermano Nacho, un referente de joven científico con el cuál tuve y tendré por muchos años la dicha de compartir proyectos de trabajo y de vida.

- A Nivian, esa hermana que me apareció por ahí, por impulsarme a seguir mis estudios en un primer momento y por tantas cruzadas durante estos años, junto a Palmiche no hubo periférico que nos detuviera.

- A todos los amigos de Guadalajara, en especial a Maydes, Wilbert, Félix, Mariam, Ana, Magdiel, Miró y Yailen. Sobre sus hombros se liberó mucho estrés. Imposible no extender un agradecimiento especial a Don Satur por brindarme un hogar en Guadalajara y hacerme parte de su familia.

- A esos chiquilines que me llenan de satisfacción al decirme tío: Naty, Anthony, Alam, Angélica y Adrianita

La tesis se terminó, y un porciento mayoritario se debe a mi esposa Leyanet, quien no solo aseguró la logística para que tuviera el tiempo y la tranquilidad mental para enfrentar el doctorado, sino que también participó en la elaboración de la base de datos y en la redacción. Esta tesis es de ella también, ¡ambos lo logramos así!

Mi mamá, mi papá, mi hermano Carli, mis abuelos, mis tías, mis primos, un familión que me alimenta con un apoyo infinito, lleno de positivismo. Si alguna vez digo que soy doctor en ciencias será pensando en ellos. ¡Cuánto agradezco que hayan reducido la distancia a nada, sus besos y abrazos los tuve siempre!

Y claro, no podría faltar mi pelusita Ema, quién llegó al final del proyecto y se quedará por siempre.

A ella le dedico esta tesis y le dedicaré toda mi vida. Espero que este trabajo le ayude a entender que estar rodeado de tanto talento conduce a grandes éxitos.

Finalmente agradezco al programa del Doctorado en Geografía y Ordenamiento Territorial (DOGT) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por ser el sustento institucional que me ha dado acceso a mi formación y al conocimiento.

Resumen

En México se presentan una serie de características que convierten a la lluvia extrema en un fenómeno peligroso a tratar. Atendiendo a estas cuestiones, se hace necesario un estudio geográfico con un análisis multisecular temporal y espacial para conocer el comportamiento de la lluvia extrema en Jalisco. Esto con vistas a disminuir la vulnerabilidad y el respectivo riesgo, a partir del conocimiento sobre el peligro potencial que representa y el grado de exposición física ha dicho fenómeno. Se tomaron datos de las estaciones meteorológicas de CONAGUA y el producto satelital CHIRPS para la precipitación, posteriormente la cartografía y el censo poblacional fue proporcionado por INEGI para la exposición física y la vulnerabilidad. En cuanto a las herramientas, el procesamiento de los datos se realizó utilizando la paquetería QGIS, ArcGIS, MATLAB y Microsoft Excel, que a partir de las cuales se construyeron los gráficos, mapas, análisis estadísticos y tabulados que se presentan en el documento. El conjunto de resultados de la presente investigación representa una herramienta para mitigar el riesgo potencial ya que se logró aportar conocimiento sobre la compleja interacción del fenómeno de precipitación con la población en el estado de Jalisco, estableciendo un marco teórico y una metodología acordes con este problema social, de origen natural y de repercusión territorial variable a escala municipal.

Palabras Claves: Precipitación Extrema; Riesgo, Amenaza, Vulnerabilidad y Sistemas de Información Geográfica

Abstract

In Mexico there are a series of characteristics that make extreme rain a dangerous phenomenon to deal with. Taking into account these issues, a geographical study with a multi-secular temporal and spatial analysis is necessary to understand the behavior of extreme rain in Jalisco. This is with a view to reducing vulnerability and the respective risk, based on knowledge about the potential danger that this phenomenon represents and the degree of physical exposure. Data were taken from the CONAGUA meteorological stations and the CHIRPS satellite product for precipitation, subsequently the cartography and population census was provided by INEGI for physical exposure and vulnerability. Regarding the tools, the data processing was carried out using the QGIS, ArcGIS, MATLAB

and Microsoft Excel packages, from which the graphs, maps, statistical analyzes and tabulations presented in the document were constructed. The set of results of this research represents a tool to mitigate the potential risk since it was possible to provide knowledge about the complex interaction of the precipitation phenomenon with the population in the state of Jalisco, establishing a theoretical framework and a methodology in accordance with this problem. social, of natural origin and of variable territorial impact at the municipal level.

Keywords: Extreme Precipitation; Risk, Threat, Vulnerability and Geographic Information Systems

Resumo

No México há uma série de características que tornam as chuvas extremas um fenômeno perigoso de se lidar. Tendo em conta estas questões, é necessário um estudo geográfico com uma análise temporal e espacial multissecular para compreender o comportamento das chuvas extremas em Jalisco. Isto com vista à redução da vulnerabilidade e do respetivo risco, com base no conhecimento sobre o perigo potencial que este fenómeno representa e o grau de exposição física. Os dados foram retirados das estações meteorológicas da CONAGUA e do produto do satélite CHIRPS para precipitação, posteriormente a cartografia e o censo populacional foram fornecidos pelo INEGI para exposição física e vulnerabilidade. Quanto às ferramentas, o tratamento dos dados foi realizado através dos pacotes QGIS, ArcGIS, MATLAB e Microsoft Excel, a partir dos quais foram construídos os gráficos, mapas, análises estatísticas e tabulações apresentadas no documento. O conjunto de resultados desta pesquisa representa uma ferramenta para mitigar o risco potencial, pois foi possível fornecer conhecimento sobre a complexa interação do fenómeno da precipitação com a população do estado de Jalisco, estabelecendo um referencial teórico e uma metodologia de acordo com isso. problema.social, de origem natural e de impacto territorial variável em nível municipal.

Palavras-chave: Precipitação Extrema; Risco, Ameaça, Vulnerabilidade e Sistemas de Informação Geográfica

Introducción

El mundo se vuelve cada día más complejo y reclama que todos los individuos estén en condiciones de hacer frente a esa complejidad. Es necesario que se involucren los propios hombres y mujeres en sus vidas y actuar cotidiano, como científicos con su principal tarea de interpretar la realidad, conocerla y estudiarla con el fin de responder a las necesidades y disyuntivas cada vez más crecientes.

Conocer a aprehender la realidad misma reclama de su interpretación y traducción tal y como ella existe. Un mundo en constante movimiento, desarrollo y transformación, para lo cual es imposible comprenderlo sin entender la concatenación, interdependencia e interacción de los fenómenos naturales y como nos aquejan.

La ciencia tiene como principal propósito entender y explicar los fenómenos de la naturaleza, los procesos sociales y a la sociedad misma. Los estudios sobre riesgos, con vistas a minimizar en lo posible sus efectos adversos, son una ramificación de la ciencia de gran peso en la actualidad.

Este concepto, riesgo, requiere de análisis integradores que identifiquen factores de peligro, exposición, vulnerabilidad y resiliencia. Precisamente, una de las vertientes de riesgo, quizás la más común y compleja a la vez, tiene un origen medioambiental. En esta línea destaca el fenómeno natural que en la actualidad se ha convertido en la mayor amenaza existente, el cambio climático. Muchas investigaciones apuntan a una acentuación debido a factores antropogénicos, lo que deviene en una mayor preocupación ante los efectos devastadores que puede acarrear para la estructura socioeconómica de cualquier país.

Los efectos del cambio climático actual se documentan continuamente con evidencia tanto empírica como teórica, y las proyecciones futuras muestran un escenario desfavorable para la biodiversidad (Carter y la Rovere, 2001), donde un pequeño cambio en las condiciones promedio puede provocar cambios significativos. (Katz y Brown, 1992). Por tanto, el grado de manifestación del cambio climático está estrechamente relacionado con los cambios en la intensidad y frecuencia de los valores extremos de las fluctuaciones climáticas.

Según Kunkel (2003), es posible que un aumento de la temperatura global (multiplicado por un aumento del efecto invernadero) sea directamente proporcional a la humedad y

precipitación extrema, lo que fortalece el ciclo hidrológico; conclusión que no debe tomarse como una verdad absoluta debido a la complejidad del mecanismo de precipitación (el calentamiento puede no ser diferente y tener el efecto contrario), sino como un indicador de esa posible relación. Por lo tanto, la precipitación, especialmente los eventos extremos, se ha colocado entre los factores de riesgo ocultos y un tema prioritario en los estudios de riesgo. Según Aristizábal y Yokota (2006), las fluctuaciones en la frecuencia e intensidad de las lluvias intensas durante un período de 24 horas contribuyen a un aumento de los procesos geomorfológicos dinámicos que incrementan las pérdidas humanas y materiales. Incluso sin estos cambios en duración y severidad, solo el crecimiento de la población y el asentamiento irregular en áreas sensibles causarían este efecto.

De tal manera que cada región necesita lograr un alto grado de conocimiento sobre el comportamiento de las precipitaciones en su territorio, así como sus principales características y limitaciones. Esto permitirá mejorar las estrategias tanto para aprovechar de los recursos hídricos disponibles, como para mitigar el riesgo potencial que pudiera representar, adaptando las políticas de desarrollo en los diferentes sectores a las condiciones particulares. Según Monjo (2010), tanto los recursos agrícolas como la gestión de las zonas urbanas se planifican considerando el potencial de precipitaciones extremas de cada zona.

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico y es responsable de la acumulación de agua dulce y por lo tanto de la vida en nuestro planeta, y de los animales y plantas que necesitan agua para vivir. Es cualquier hidrometeoro que cae de la atmósfera y alcanza la superficie de la Tierra. Según Strahler (1994), este fenómeno engloba aquellas tanto de tipo sólido como líquido, presentándose en forma de granizo, nieve, aguanieve y lluvia (llovizna, lluvia o chubasco en dependencia del diámetro de la gota), siendo esta última la forma más común en la cual se puede presentar. Aunque la lluvia constituye un eslabón fundamental del ciclo hidrológico y componente indispensable para la vida, no exonera que, a partir de ciertas magnitudes, la lluvia pueda representar un peligro potencial para la estabilidad de cualquier ecosistema terrestre. Tal es el caso cuando presenta acumulados significativos, que se pueden catalogar como intensos.

Alrededor del mundo se utilizan diversos criterios para definir una lluvia como extrema, pudiendo variar tanto el valor del acumulado en milímetros y el tiempo en el cual se registra.

Sin embargo, los umbrales que se toman siempre están relacionados con la capacidad de generar afectaciones socioeconómicas.

La lluvia extrema es considerada un fenómeno severo y un peligro natural según la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Puede producir grandes inundaciones fluviales, deslizamiento de laderas, erosión de los suelos, cambios en los cauces y en las llanuras aluviales; afectaciones sobre todo de tipo geomorfológico que conducen a la pérdida de recursos naturales, económicos y, en el peor de los casos, daños a la vida humana (García et al., 1999). Por lo que, dentro de los estudios de riesgo, este tema cobra una connotación especial, siendo recurrente en las agendas de la comunidad científica.

Por su condición de fenómeno natural, los objetivos de sus estudios no pueden ir encaminados a evitarlo, más bien deben enfocarse a la prevención de desastres para lo cual es indispensable partir del conocimiento geográfico profundo de la realidad física y del comportamiento espacio-temporal del fenómeno.

Problema

En México se presentan una serie de características que convierten a la lluvia extrema en un fenómeno peligroso a tratar. Gran parte del país se encuentra ubicado dentro de la zona tropical, región donde por lo general la energía solar recibida se utiliza como fuente de calor latente para los procesos de evaporación; así, los altos valores de temperatura y humedad se combinan con presiones atmosféricas bajas para producir elevados acumulados anuales de precipitación. Además, el país es afectado por sistemas meteorológicos típicos de diferentes latitudes como ciclones tropicales, bajas extratropicales, sistemas frontales, corrientes en chorro, entre otros; todos estos fenómenos son generadores de precipitación. Por su parte, la complejidad orográfica, con la Altiplanicie Mexicana delimitada por sistemas montañosos como la Sierra Madre Oriental y Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana, también contribuye a procesos convectivos y la consecuente formación de nubosidad y lluvia, siendo uno de los moduladores claves en el régimen de precipitación nacional (García, 2003). En el año 2020, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) informó que cerca de 35 millones de habitantes residían en zonas de riesgo por inundaciones, uno de los motivadores principales en los estudios de lluvia intensa.

En el estado de Jalisco en particular, estos temas convergen, con el aliciente adicional de que las costas se ubican en el noreste del Océano Pacífico, hogar de la segunda actividad ciclónica tropical más grande del mundo. Al ser un gran estado agrícola con destinos turísticos de importancia nacional como Puerto Vallarta y una de las zonas más pobladas del país, el área metropolitana de Guadalajara, el riesgo potencial de fuertes lluvias es mayor.

Atendiendo a estas cuestiones, se hace necesario un estudio en un espacio geográfico con un análisis multiescalar temporal y espacial para conocer con alto grado de profundidad el comportamiento de la lluvia extrema en Jalisco, así como los factores atmosféricos relacionados con la misma. Esto con vistas a disminuir la vulnerabilidad y el respectivo riesgo, a partir del conocimiento sobre el peligro potencial que representa y el grado de exposición física a dicho fenómeno.

Pregunta de Investigación:

¿Cómo impactan el peligro, la exposición física y la vulnerabilidad asociados a las lluvias extremas en el riesgo ante fenómenos naturales en el estado de Jalisco?

Objetivos

Objetivo General:

- Analizar el riesgo asociado a la lluvia extrema en el estado de Jalisco como insumo de los instrumentos de gestión del riesgo.

Objetivos Específicos:

- Elaborar mapas de peligro a partir de la distribución espacio-temporal y la variabilidad climática de los eventos de lluvias máximas en Jalisco.
- Identificar las zonas de mayor exposición física a las precipitaciones extremas y su impacto en el sector poblacional en la zona de estudio.
- Determinar el grado de vulnerabilidad a las precipitaciones extremas por municipios.

Hipótesis

Al ser un gran país agrícola con importantes zonas turísticas a nivel nacional como Puerto Vallarta y una de las zonas más pobladas del país, la Zona Metropolitana de Guadalajara (AMG), el riesgo de precipitaciones extremas aumenta.

Delimitación Espacial

El informe se centra en el estado de Jalisco, que es una de las regiones más grandes del país desde el punto de vista económico y demográfico. Luego, nos referimos a varias características del campo de investigación.

La región está ubicada (Figura 1) en la parte centro occidental de México entre 18°15'05" y 22°51'9" N y 101°28'15" y 105° 3'18" O, con un área. de 80.137 km² abarcando el 4% de la superficie del país. Limita con los estados de Nayarit, Zacatecas y Aguascalientes al norte, Guanajuato al este, Colima y Michoacán al sur y el Pacífico al oeste. En cuanto a la orografía, se destacan el Eje Neovolcánico Transversal, la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur, la depresión del Balsas y la Mesa Central (Ramos et al., 2007); con elevaciones de 0-4260 msnm; el máximo corresponde al Nevado de Colima.

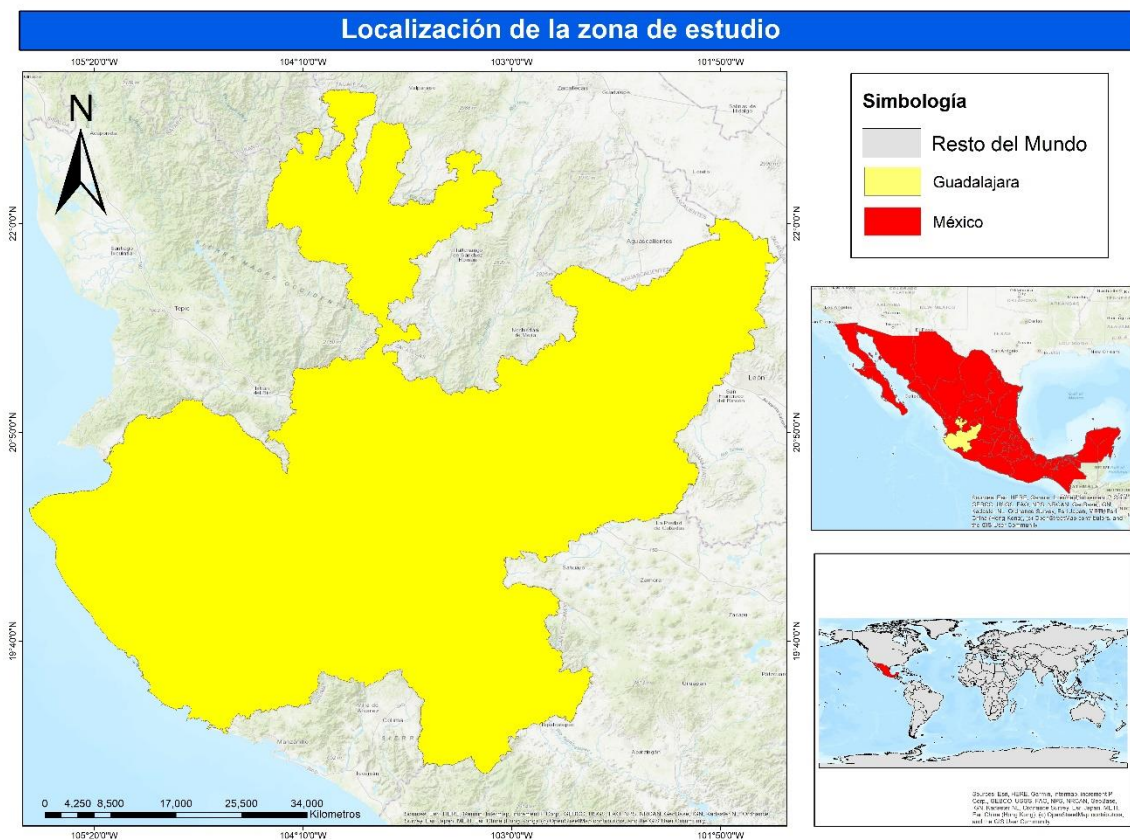


Figura 1: Ubicación geográfica del Estado de Jalisco. Fuente: elaboración propia en base a cartografía del INEGI.

Según la proyección del Consejo Nacional de Población (CONAPO), la población total al inicio de 2020 es de 8 348 151 habitantes, siendo el tercer estado más poblado según el Instituto de Estadística y Geografía (INEGI). Jalisco consta de 125 municipios. Destaca la Zona Metropolitana de Guadalajara (AMG) con la mayor concentración poblacional, con una población total de 5, 243 392 según INEGI 2010, la cual está conformada por los municipios de Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque y Tlajomulco de. Zúñiga, El Salto, Tonalá, Ixtlahuacán de los Membrillos, Zapotlanejo y Juanacatlán.

En cuanto al clima, según el Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM) de la Universidad de Guadalajara (UDG), existen dos periodos bien definidos en el año: la temporada de lluvias, que se extiende desde mediados de junio hasta finales de octubre, pudiendo adelantarse en las zonas costeras y sur del estado y atrasarse en la región norte, con el 90% del total anual de precipitación, y un período seco en el resto de los meses.

Los principales sectores económicos son el comercio, la propiedad inmobiliaria y el arrendamiento de bienes muebles e inmateriales, la construcción, la agricultura y la ganadería, la silvicultura, la pesca, la caza y la industria alimentaria. Las industrias estratégicas incluyen turismo, moda, gourmet, electrónica, automotriz y tecnología de la información. Cuenta con una extensa red de rutas de transporte terrestre, además de dos puertos de alta calificación, dos aeropuertos internacionales y 33 aeropuertos (www.gob.mx). Mención especial merece la agricultura, que a nivel nacional ocupa el primer lugar en la producción de maíz forrajero y en grano, pastos, agave, caña de azúcar, entre otros (INEGI, 2016).

Para la consecución del objetivo de investigación, este trabajo se organiza en un total de cuatro capítulos. Primero se aborda del marco teórico a partir de referentes como White (1974), Beck (2000), Dao y Peduzzi (2003), Soldano (2009), Coburn et al. (1991) y Romo (2018), además se profundiza en el estado del arte sobre el tema tratado. En el segundo capítulo se explica la metodología aplicada, donde se detallan los métodos, técnicas e instrumentos para cada uno de los objetivos específicos. Los capítulos tres y cuatro se dedican a los resultados, desde la evaluación correcta del peligro hasta la integración de las componentes exposición física y vulnerabilidad. Finalmente se concluyen los aspectos más importantes del trabajo y se dejan recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el riesgo de lluvias extremas.

Marco Teórico

En este capítulo se presentan los principales preceptos teóricos alrededor del peligro y la exposición como componentes del riesgo asociado a la lluvia intensa en Jalisco. En primer lugar, se toman como referentes teóricos las teorías dialéctico-marxista y la geografía de los riesgos como base de la investigación. Luego se conceptualizan aspectos como riesgo, peligro, exposición, vulnerabilidad y precipitación. Seguidamente, se puntualiza en la variabilidad climática y en las oscilaciones de gran escala El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Madden-Julian (MJO por sus siglas en inglés). Por último, se realiza una discusión sobre los antecedentes de investigaciones vinculadas con el tema, debatiendo sobre las fortalezas y limitantes de las mismas.

1.1- Teorías dialéctico marxista y geografía de los riesgos

La ciencia tiene el deber de descubrir las causas determinantes en el sistema de fuerzas en interacción, donde influyen fenómenos que se concatenan. Estos fenómenos o condiciones (lluvia extrema) son imprescindibles para que se produzca un acontecimiento concreto (fenómeno natural), al facilitar el surgimiento del efecto o incluso impedir la acción de la causa.

Precisamente, esta investigación parte de una de las teorías filosóficas fundamentales, una de las categorías principales de la Dialéctica Materialista de Carlos Marx y Federico Engels, la Ley de la Causalidad, o Causa-Efecto, tesis materialista sobre la naturaleza objetiva de la causalidad y la condicionalidad causal general de los fenómenos naturales. Según Engels (1982), a la hora de analizar todo Efecto, o Fenómeno, se debe indagar en las causas que lo provocaron. Sólo el análisis de las causas conduce a la conclusión de los efectos, es decir, la razón del Efecto está en la Causa. La existencia y sus definiciones se infieren del conocimiento "a priori" de la causa. Así, en este trabajo se analiza el fenómeno de la lluvia extrema, su comportamiento y características en la zona, como "*Causa*", con vistas a establecer una herramienta para la gestión del riesgo que disminuya sus "*Efectos*". De esta manera se busca ir a la raíz del problema y no caer directamente en productos como las inundaciones o los deslaves.

Esta teoría dialéctico materialista constituye solo la plataforma general sobre la cual emerge esta investigación. Más en concreto, los objetivos del presente estudio serán conducidos desde la perspectiva de la geografía de los riesgos. Esta arista científica se remonta a siglos de antaño donde los filósofos griegos daban los primeros pasos en la comprensión del complejo sistema hombre-naturaleza-desastre. Aunque no fue sino hasta mediados del siglo XX donde comienza a ser reconocida como una rama de la geografía y cobra matices de protagonismo entre los científicos del área. Por sus cruciales aportes, es vital mencionar la obra de Gilbert White (1911-2006), máximo exponente del enfoque ambientalista del análisis de los riesgos y desastres. A continuación, se indican dos preceptos teóricos de dicho científico que se retoman en la presente investigación.

Martínez (2009), haciendo alusión a las conclusiones de White (1974), brinda un referente de antesala para los estudios de riesgo: "Es importante que la sociedad pueda aprovechar el

estado normal del proceso y al mismo tiempo adaptar su vida a eventos extremos en el medio ambiente.” (p. 252). Osea, la misión no se enfoca en modificar el ambiente, sino tomar lo mejor de él y adaptarse a las cuestiones “negativas”. Una idea acorde con otro principio básico de la dialéctica materialista de Engels (1982), la “Ley de la Negación de la Negación”: lo nuevo no niega lo viejo, sino que toma su esencia y lo desarrolla.

El propio White, en colaboración con Burton y Kates (Burton et al. 1978), plantea la pregunta inicial que prima en esta arista de la geografía y en base a la cual se elaboraron las posteriores teorías y conceptualizaciones: ¿de qué manera se puede abordar al medioambiente como un factor de riesgo? En dicho trabajo se resumen cinco parámetros básicos para tratar esta incógnita: la magnitud de un acontecimiento, su frecuencia, duración, velocidad de desarrollo e impacto y grado de regularidad.

Esta tesis además se soporta en el análisis, desde una perspectiva posmodernista, de Ulrich Beck sobre lo que llamó “la sociedad del riesgo”, en específico el apartado de “incertidumbres manufacturadas”. Beck (2000) utiliza este término para explicar cómo el conocimiento sobre el riesgo puede encauzar dos caminos. El primero implica que el conocimiento trae consigo un abanico de nuevas incógnitas las cuales pueden derivarse la identificación de nuevos riesgos. Sin embargo, este camino, aunque cierto y palpable en acontecimientos catastróficos en la historia de la humanidad (como el accidente en la central nuclear de Chernóbil), no puede representar más que una alerta para tomar, más precavidos y con criterios fundamentados, el segundo camino. Éste nos estimula a aumentar cada vez más el conocimiento sobre los fenómenos naturales e interrelaciones sociales que conducen a la construcción de riesgos, toda vez que, como indica el propio autor “los riesgos vienen de y consisten en inconsciencia, (no-conocimiento)” (p. 14).

En cuanto a los enfoques desde los cuales se pueden analizar el riesgo, se tienen dos vertientes: la orientación de carácter positivista, en la línea de las ciencias naturales que trabajan con datos y hechos cuantificables, y los modelos de tipo interpretativo o hermenéutico, centrados en la esencia cualitativa del concepto (Ramírez, 2009). Basado en dicha teoría, la actual investigación se centra en la primera vertiente.

Esta meta tiene como camino el estudio de las características pasadas y presentes de eventos naturales extraordinarios que impactan con frecuencia un espacio geográfico.

1.2- Riesgo

Teniendo como plataforma estas teorías generales, los objetivos de este trabajo quedan enmarcados dentro de los estudios de riesgo medioambiental. Dicho concepto ha sido modular para varias organizaciones internacionales, destacándose la Organización de las Naciones Unidas para el Socorro en caso de Desastres (UNDRO por sus siglas en inglés), la cual lo refiere como las pérdidas esperadas de un peligro particular a un elemento específico en riesgo en un período de tiempo futuro particular.

El concepto de riesgo ha evolucionado hasta posicionarlo como una consecuencia del actuar inadecuado del hombre, directamente proporcional al desarrollo mismo de la sociedad y modulado por las complejas interrelaciones en la comunidad bajo el patrón de un mundo globalizado. Así lo describen Ayala y Olcina (2002): “La manifestación territorial de la actividad humana que no se ajusta a las características del medio en que se desarrolla, es decir, es una violación que comete una persona por la realización inadecuada de actividades o asentamientos en la zona”. (pág. 82). Por lo tanto, un fenómeno natural no puede considerarse un riesgo oculto, especialmente un desastre natural.

A su vez, Dao y Peduzzi (2003) resumen las tres componentes de riesgo: 1- probabilidad de ocurrencia de peligro, definida como el nivel de gravedad en un cierto período futuro; 2- elementos en riesgo, una lista de personas u objetos expuestos a la amenaza, y 3- vulnerabilidad, la tasa de pérdida de cada elemento cuando se presenta una amenaza de cierta gravedad.

Dentro de las múltiples teorías que han abordado el concepto de riesgo, se trae a colación el planteado por Cuevas (2011):

“El riesgo generalmente se define en relación con un peligro y se describe como de naturaleza probabilística. Específicamente, es: - la probabilidad de que ocurra un peligro que desencadena un desastre o una secuencia de eventos con un resultado no deseado; o - la probabilidad de un desastre o resultado cuando la probabilidad de un evento peligroso se combina con las consecuencias probables del peligro” (pp. 46).

De esta manera, se trabaja el riesgo desde sus componentes de peligro (características físicas del fenómeno lluvia intensa), exposición física (población, agricultura y turismo) y vulnerabilidad.

A su vez, la presente investigación se sustenta teóricamente en Ayala y Olcina (2002), donde se plantea la misión de los estudios de riesgos naturales: discernir entre los numerosos datos que ofrece el territorio para lograr un conocimiento lo más completo posible de los “territorios de riesgo”, viéndolo como un problema social de origen natural y de repercusión territorial.

1.3- Peligro, Exposición y Vulnerabilidad

El peligro, primera componente del riesgo a tratar, es catalogado por Foschiatti (2004) como: “un evento que puede causar daños graves donde ocurre. El peligro se refiere a la presencia de una persona que determina cuándo ocurre el daño. Inundaciones, sequías, tormentas, terremotos, erupciones volcánicas, huracanes y otros son fenómenos naturales que se vuelven peligrosos solo cuando ocurren en viviendas humanas.” (p. 6). En este concepto se deja claro la realidad del mismo, como un fenómeno natural que se convierte en peligroso cuando entra en contacto con el hombre y puede desencadenar afectaciones. No obstante, deja entrever que solo es considerado como tal si se produce en zonas habitadas por humanos.

Sin embargo, el tema de la lluvia extrema no solo puede ser peligroso en esta situación, también es fuente de destrucción para actividades económicas como la agricultura, la ganadería, entre otras. Debido a este panorama, en el presente estudio se adopta como referente teórico la definición empleada por Dao y Peduzzi (1996), como una amenaza potencial para los humanos y “su bienestar” (así se abarca el radio de acción del peligro); mientras que, igualmente, especifican en el concepto de peligro refiriéndose a la interacción potencial entre humanos y eventos naturales extremos; representando el potencial o la probabilidad de ocurrencia de un evento.

Existen varias subcategorías de peligro: ambiental, antrópico y natural (Aneas, 2000). El peligro ambiental asume que el fenómeno que produce afectaciones tiene una influencia combinada, naturales y causadas por el hombre; sin embargo, en la metodología de este trabajo no se considera la posible injerencia antrópica en la variabilidad de la lluvia intensa.

De igual forma se descarta la segunda clase. Por lo que se asume el peligro como natural, al tener su raíz precisamente en la naturaleza.

Para la evaluación del peligro natural, Soldano (2009) plantea una teoría interesante donde divide el análisis en 4 grandes grupos basados en el pasado como clave para entender el futuro: análisis histórico (determinación de períodos de retorno y magnitud de los mismos), análisis heurístico (basado en la experiencia de un especialista que estudie el grado de susceptibilidad de un territorio), análisis estadístico (relaciones estadísticas de los datos relacionados con la amenaza) y análisis determinístico (simulación de eventos utilizando modelos matemáticos basados en los fenómenos físicos en estudio). Esta teoría se pone en práctica en esta tesis con las dimensiones de análisis histórico, heurístico y estadístico.

Estudio este efectuado bajo la lupa permanente de un aspecto fundamental planteado por Dr. Ricardo Quiroga, especialista de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA por sus siglas en inglés), en el marco del Simposio Internacional “Diálogos entre Saberes Ancestrales y la ciencia de los ciclones tropicales” en mayo de 2020 (a través del ciberespacio), donde expresó: “no podemos seguir planeando con el riesgo del pasado, el pasado no es un indicador fiable para el futuro”. O sea, el análisis histórico es una herramienta que ofrece una imprescindible primera aproximación, aunque debe actualizarse constantemente y no tomarse como verdad absoluta; requiere de una interpretación que asume sesgos.

Exposición Física

Otra de las componentes de la ecuación de riesgo mencionada anteriormente es la exposición física. Este concepto inicialmente fue considerado como homólogo de vulnerabilidad, teniendo ambos términos la misma magnitud y alcance, “estar en el lugar equivocado en el momento equivocado” (Saurí, 2003).

Con el surgimiento de la ecología política, corriente anglosajona centrada en la relación naturaleza y sociedad que parte como alternativa al materialismo histórico clasista del marxismo, se adopta una visión más amplia del análisis de los riesgos. Tal como apunta Hewitt (1983), el riesgo debe entenderse dentro de una cotidianidad socioambiental que juega un papel modulador, tanto positivo como negativo, en dependencia de sus propias dinámicas.

Por lo que la sociedad, con todas sus características étnicas, de género, económicas, educativas y culturales, pasa de un rol pasivo a uno activo. Sentado en estas bases y desde la geografía de los riesgos, se comienzan a separar ambas componentes: la exposición física como las estructuras que están dentro del rango de acción de un peligro, y la vulnerabilidad como la disposición interna, dependiente de las características intrínsecas de la sociedad, a ser afectado por una amenaza.

Si bien una mayor exposición al agente natural (peligro) suele derivar en una mayor vulnerabilidad, no es una condición suficiente. Incluso, no necesariamente tienen que ser directamente proporcionales. Las experiencias, tanto colectivas como personales, cognitivas o reales, ante el impacto de determinado peligro, conducen en muchos casos a una ruptura en la dirección en que se manifiestan ambos términos. Así, podemos tener sociedades más expuestas, pero menos vulnerables y viceversa.

Por lo que, en la presente investigación se estudia la exposición física como elemento individual, y como precepto teórico se utiliza la síntesis plasmada por Coburn et al. (1991): “Elementos en riesgo, un inventario de aquellas personas o artefactos que están expuestos al peligro”. Con una dimensión físico-geográfica, se dirigirá el análisis hacia aquellas instalaciones y actividades socioeconómicas que se encuentren bajo el radio de acción del peligro en cuestión.

Vulnerabilidad

La última componente de la ecuación de riesgo es la vulnerabilidad, concepto que ha sido tratado desde diferentes corrientes teórico-metodológicas. Tal es el caso, como se mencionó anteriormente, de la ecología política, la cual contempla a la vulnerabilidad como el elemento clave que deriva en la ocurrencia de un desastre (Wisner et al. 2005).

Un fenómeno natural puede ser una amenaza, un recurso o simplemente parte de un sistema ambiental sin impacto significativo, pero nunca un desastre en sí mismo. Más bien, el desastre resulta de una sinergia entre la naturaleza y factores históricos socioeconómicos, políticos, culturales y ambientales que distribuyen la población y sus características biofísicas de manera desigual a lo largo del territorio (Romero T & Romero A, 2015).

Desde esta perspectiva, la vulnerabilidad se refiere a las características o circunstancias de una persona o grupo que modifican su capacidad para anticipar, resistir o recuperarse de las consecuencias de un evento extremo o proceso natural. Incluye múltiples aspectos que definen la vida y sus formas (organización, conocimiento, redes sociales, cultura, acceso y uso de la tierra y los recursos naturales), la propiedad y otros elementos amenazados (Wisner et al. 2005, p. 11).

Por lo tanto, se puede catalogar a la vulnerabilidad como una creación humana (Bankoff et al. 2004) asociada al grado de incapacidad para enfrentar una amenaza, una causa de conflictos sociales que tiene su máxima expresión en desastres socio-naturales (Eakin & Luers, 2006).

Partiendo de una estructura socio-económica expuesta a determinado peligro, por ejemplo, la población, la vulnerabilidad dirige su análisis a las características de esa población que la hace más o menos propensa a lidiar con la amenaza potencial. Para su estimación se utilizan diversos métodos e indicadores (e.j., Balica, Dinh y Popescu, 2015), los cuales determinan el marco de la vulnerabilidad y el alcance de la investigación.

A raíz de una revisión y análisis sobre las diferentes aproximaciones y variables que han empleado los investigadores para tratar la vulnerabilidad, desde abordajes tradicionales hasta propuestas de redefinición conceptual y metodológica, Romo (2018) desarrolló una clasificación de los enfoques desde los cuales se estudia la vulnerabilidad. La autora los englobó en tres grupos: estructuralista u objetivo, subjetivo o creativo y geográfico integral o sistémico multidimensional.

En el caso que ocupa al presente estudio, la lluvia extrema es un peligro que puede transformarse o derivarse en una diversidad de fenómenos como son inundaciones, deslizamiento de laderas y erosión de suelos. A cada uno de ellos se asocian afectaciones potenciales particulares, no siempre relacionadas entre sí ni en la misma dirección de impacto. Así, cada una de las manifestaciones o resultados de la precipitación extrema está aparejado con indicadores de vulnerabilidad específicos, sobre todo de tipo subjetivo.

Por lo tanto, en este trabajo se adopta el enfoque estructuralista de la vulnerabilidad, que se define como “la identificación de elementos técnicos..., donde la vulnerabilidad se identifica

como algo fijo y el sistema afectable, y los eventos hidrometeorológicos que lo afectan, como la causa del riesgo” (Romo, 2018, p.240). Partiendo del precepto teórico de Romo (2018), esta vulnerabilidad toma en cuenta solo los parámetros de tipo estructural, no así factores culturales, ideológicos y de percepción.

Estos conceptos serán aplicados para el establecimiento de la metodología empleada en esta investigación, la cual encaja en el paradigma (dentro de la geografía) de la geografía cuantitativa. Propuesto por Burton (1963), evolucionó hasta convertirse en el paradigma básico de las tecnologías digitales (especialmente los sistemas de información geográfica). “Esperamos que con la ayuda de la información obtenida podamos medir la escala de los problemas socioeconómicos y ambientales analizados, identificar patrones de distribución espacial y, con la ayuda de los elementos obtenidos, facilitar el diseño de determinadas acciones o políticas públicas. en la búsqueda de soluciones específicas” (Buzai y León, 2015, p.47).

1.4- Precipitación extrema: máxima e intensa

La precipitación es el sujeto de estudio de este trabajo, la cual se define como la caída de un hidrometeoro (gotas de agua y cristales de hielo) desde una nube hasta la superficie terrestre. La precipitación es producida por ascenso y enfriamiento del aire húmedo; al disminuir la temperatura disminuye la capacidad de mantener el agua en forma de vapor, condensándose rápidamente. Este proceso termodinámico ocurre de varias formas:

Convección: Esto ocurre cuando una masa de aire asciende porque tiene una temperatura más alta y, por lo tanto, es más ligera que el aire que la rodea. Como resultado, la masa se enfría y comienza el proceso de condensación que provoca la lluvia convectiva.

Orográfica: Ocurre cuando una masa de aire puede ser forzada a subir a un nivel más frío cuando se encuentra, por ejemplo, con una cadena montañosa en el camino. La lluvia producida por este método se denomina orográfica o de relieve.

Frontal o Ciclónico: Es un proceso similar al anterior y ocurre cuando una masa de aire caliente se encuentra con una gran masa de aire frío. Debido a que las masas de aire no suelen mezclarse, el aire caliente asciende y se desliza sobre el aire frío, provocando enfriamiento, condensación y lluvia.

La precipitación puede dividirse en varios grupos de acuerdo con el estado de agregación con el cual el hidrometeoro llega a la superficie terrestre: lluvia, granizo, nieve y aguanieve. La lluvia es en forma líquida y a su vez puede ser dividida en tres dependiendo del diámetro de la gota, de la intensidad y de la duración:

- Llovizna: Riego ligero de pequeñas gotas de menos de 0,5 milímetros, muy denso o denso. Se puede considerar débil, moderado o fuerte dependiendo de la visibilidad.

- Lluvia: Se define como la precipitación de agua líquida que llega al suelo y tiene entre 0,5 y 5 milímetros.

- Chubasco: Los chubascos son gotas con mayor tamaño que suelen caer de una forma violenta y durante un corto periodo de tiempo. Se suelen dar en lugares donde la presión atmosférica disminuye y se crea un centro de bajas presiones llamado borrasca. Este tipo de lluvia se asocia con aquellas nubes tipo Cumulonimbus que se forman demasiado rápido, haciendo que las gotas de agua crezcan.

Como todo fenómeno natural, en este caso atmosférico, las series temporales de lluvia exhiben patrones de variabilidad donde se pueden identificar desde los valores más comunes hasta los atípicos. Estos últimos son de especial interés para la comunidad científica debido a las implicaciones y alteraciones que pueden producir en la “estabilidad” del medio ambiente donde se presenten, pudiendo convertirse incluso en amenazas naturales.

El término que suele emplearse, sobre todo en la literatura de habla inglesa, para indicar estos valores poco comunes, fuera de la norma, atípicos, es el de *precipitación extrema*. Así lo cataloga el IPCC (quinto informe de evaluación, 2012), y lo define como “un evento que es atípico en un lugar y época del año en particular”. Si bien el vocablo extremo refiere a ambos límites, tanto inferiores como superiores, generalmente queda sesgado hacia los positivos, dejando la denominación “sequía” para los negativos.

Cuando se estudia este fenómeno, se emplean umbrales que responden a una condición estadística (posteriormente en el Estado del Arte se hace un compendio de estos criterios). De ahí que, los valores resultantes suelen ser los prominentes en la serie temporal, o sea, los máximos. En este sentido, una categoría dentro de la precipitación extrema es la de *precipitación máxima*, la cual tiene una dimensión puramente climatológica.

Precisamente, dicha dimensión le confiere una serie de obstáculos y oportunidades a su uso para los estudios de riesgo. Según la OMM, para cumplir con los requisitos de un análisis climatológico se debe contar con una data de al menos 30 años, los cuales, además, deben ser sometidos a procesos de validación ante posibles errores en las observaciones. Sin embargo, con el devenir de los satélites, así como el desarrollo de modelos atmosféricos de reanálisis (por ejemplo, el proyecto NCEP/NCAR de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, NOAA), se puede contar con datos alternativos a las estaciones *in situ* que contribuyen a optimizar estas series temporales. Por su parte, los indicadores de precipitación máxima conllevan a productos muy útiles para los instrumentos de gestión del riesgo como es el caso de análisis de recurrencia, más conocidos como períodos de retorno (ver apartado metodológico) e indicadores de cambio climático recomendados por el IPCC.

La precipitación extrema puede derivar, a su vez, en afectaciones en el terreno como lo son inundaciones, deslizamientos de laderas, erosión de suelos, entre otros, convirtiéndose en un evento intenso. Sin embargo, en estos efectos entran en juego otras causas, propias del entorno geográfico donde se presente la lluvia, desde aspectos naturales como tipo de suelo y cobertura vegetal, hasta modificaciones antropogénicas como sistemas de drenaje, mancha urbana, uso de suelo y alteraciones en el cauce de cuerpos de agua. De esta manera, en la presente tesis se contempla el término de *precipitación intensa* como aquellos valores de lluvia que provocan siempre un evento peligroso en el terreno. Así, esta categoría adiciona otras dos dimensiones: una natural, referida a las características del terreno y una social, atribuida a las modificaciones que ejerce el hombre sobre el mismo territorio.

Por lo tanto, la precipitación extrema se subdivide en dos componentes, máxima e intensa. Además, aunque poseen una dimensión en común (la climatológica), se aclara que ambos términos no son equivalentes ya que una lluvia máxima no necesariamente conduce a un evento severo, a la par que un evento severo no siempre va a tener su génesis en un valor estrictamente máximo de lluvia.

Debido a que en la presente investigación se tomaran los acumulados de lluvia en 24 horas, un valor intenso puede estar dado por un chubasco en corto período de tiempo o por una lluvia constante en más horas. Aunque no tienen igual peso para la ocurrencia de una

inundación, donde mucha lluvia en un periodo corto, como generalmente ocurre en esta zona de estudio, es la responsable de las inundaciones en la gran mayoría de los casos.

1.5- Variabilidad climática

La variabilidad climática es otro de los temas a esclarecer. Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) en su sitio web <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.php>. La variabilidad climática se define como cambios en el estado promedio del clima en todas las escalas temporales y espaciales, además de eventos climáticos individuales. El término "variabilidad climática" se usa a menudo para describir las desviaciones en las estadísticas climáticas para un período de tiempo específico (como un mes, una estación o un año) en comparación con las estadísticas a largo plazo para el mismo período de calendario. La variabilidad climática se mide por estas desviaciones, a menudo llamadas anomalías. La variabilidad puede resultar de procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o de fluctuaciones en factores externos naturales o provocados por el hombre (variabilidad externa).

Dentro de sus estudios se involucra el hipotético impacto de oscilaciones atmosféricas de gran escala (MJO y ENSO), un tema de amplio interés en la actualidad.

Se buscará la señal de La Oscilación Madden-Julian en la distribución temporal de la lluvia intensa, debido a ser considerada como el modo dominante de variabilidad intraestacional tropical en el sistema de la Tierra (Madden y Julian, 1971). Este fenómeno se conecta a eventos meteorológicos y climáticos y tiene influencias de alto impacto en todo el mundo, como los monzones, ciclones tropicales, tornados, oleadas de frío, inundaciones e incendios forestales. El análisis original sugiere que las características principales de esta oscilación son su propagación hacia el este desde el océano Índico y su escala temporal entre 40 y 55 días. Los principales indicadores para su monitoreo son: el potencial de velocidad del viento en 200 hPa, indicando zonas de divergencia y convergencia, y la radiación de onda larga saliente, señalando zonas de mayor y menor nubosidad.

En escalas de tiempo interanuales, El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es el modo principal de variabilidad y varios estudios han encontrado vínculos notables que relacionan ENSO y cambios regionales en la frecuencia de los extremos. (Liebmann et al., 2001).

El fenómeno ENSO es un sistema acoplado océano-atmósfera, con gran impacto a nivel global en la variabilidad climática, considerado como el evento de teleconexión (cambios en la atmósfera en un lugar determinado que modifica las condiciones del tiempo en lugares remotos) de mayor singularidad y significación.

En el Océano Pacífico tropical, los vientos cercanos a la superficie son principalmente del este y se denominan vientos alisios. Tales vientos tienden a acumular agua tropical más cálida en el oeste. Debido a la alta temperatura de la superficie del mar, el aire en esta zona es más ligero, creando una atmósfera inestable con muchas nubes y lluvia. Por otro lado, el Pacífico tropical oriental es generalmente más frío debido al afloramiento del fondo del océano. Sin embargo, la presencia de agua relativamente fría impide la formación de nubes, por lo que las costas de Perú y Chile tienen solo nubes estratos bajas que producen muy poca lluvia (Magaña et al., 1997). Por la componente atmosférica está la Circulación de Walker, la cual como indica Gonzáles, 2000, es una celda cerrada donde los alisos del este se ven forzados a ascender a través de las bajas presiones que se generan en el oeste del Pacífico, con un retorno al oeste en la altura, y un descenso a través de las altas presiones del Pacífico oriental.

En una situación cíclica, el patrón de presión atmosférica cambia y las células anticiclónicas subtropicales se debilitan hasta el punto en que los vientos alisios dejan de soplar. En esta situación, las nubes y las lluvias también se desplazan hacia las Américas, provocando un período de El Niño. Por el contrario, el fenómeno de La Niña ocurre cuando se fortalece este gradiente de temperatura entre las dos zonas, aumentando por lo tanto la subsidencia en el lado occidental del océano. Ambos casos se visualizan en la Figura 2.

La búsqueda de la posible señal de esta oscilación en la variabilidad de las lluvias intensas en Jalisco se sustenta en varios teóricos como Magaña et al. (2003): “El Niño, y su contraparte La Niña, modifican también los patrones de precipitación en México” (p. 313). A su vez, Cerano (2011) recalca esta relación: “Los estudios dendrocronológicos indican que la variabilidad de las lluvias en el norte de México y el suroeste de los Estados Unidos está altamente asociada con el evento ENOS.” (p. 208).

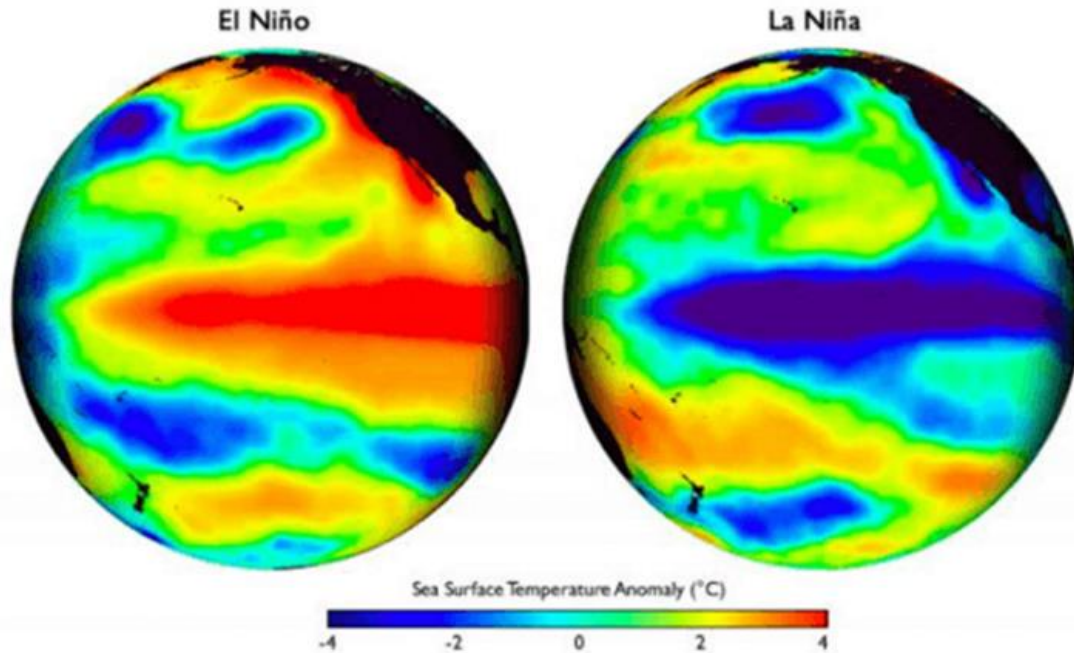


Figura 2: Anomalías de temperaturas en la superficie del mar. Las anomalías cálidas en la región ecuatorial del Pacífico se asocian con El Niño, mientras que las anomalías frías con La Niña. Tomado de la NOAA.

1.6- Gestión del riesgo

La finalidad de esta investigación es representar una herramienta útil para los instrumentos de gestión del riesgo. Dicho concepto, gestión territorial del riesgo, es definido por Cardona (2001) como “conjunto de elementos, medidas y herramientas destinados a contrarrestar amenazas o vulnerabilidades con el fin de reducir o mitigar los riesgos existentes.” (p. 30). El propio autor refiere que su objetivo va direccionado a moldear las formas de intervenir en el supuesto desastre final causado por el riesgo en cuestión, dando prioridad a la prevención-mitigación. Destaca además que su dimensión va más allá de la identidad territorial, para combinar todas las potencialidades posibles, tanto sociales, políticas, institucionales, públicas y privadas, de todos los niveles territoriales.

Por su parte, Barrantes y Rodrigo (2011) resumen tres tareas principales de dicha gestión: estimación del riesgo, disminución del riesgo y manejo del desastre; son estipuladas en ese orden teniendo en cuenta la concatenación necesaria, sirviendo una como pilar para la siguiente. Precisamente, esta tesis se encamina hacia la primera de las tareas, cuya meta, según Barrantes y Rodrigo (2011), es identificar correctamente el peligro y los niveles de vulnerabilidad para valorizar espacialmente el riesgo.

“Se pueden usar simulaciones numéricas y programas de computadora para construir escenarios probables de eventos extremos. Se utiliza para orientar las acciones de prevención y mitigación necesarias para reducir el impacto del riesgo territorial en un espacio en particular a mediano y a largo plazo, desde una Gestión Territorial del Riesgo” (Barrantes y Rodrigo, 2011, p. 23).

Así, se busca sumar eslabones en la imprescindible cultura de la prevención y el trabajo con las poblaciones en riesgo para aumentar su resiliencia.

1.7- Estado del Arte

Los cambios (incluido el cambio climático) son endémicos de la Tierra y han sido mucho más intensos durante sus mil millones de años de historia (Duarte et al., 2007). Sin embargo, el cambio climático actual tiene dos características que hacen que los impactos globales biofísicos, sociales y económicos asociados sean únicos en la historia del planeta. y las actividades humanas que impulsan este proceso (Pardo, 2007).

Una de las principales vertientes en los estudios de cambio climático y, por consiguiente, de riesgo medioambiental es el tema de la precipitación, sobre todo la considerada como intensa. Este asunto ha sido punto de mira de numerosas investigaciones a nivel mundial por su alcance, relevancia y las diversas implicaciones socioeconómicas que acarrea. Además de su relación con desastres naturales como inundaciones, erosión de suelos y pérdida de infraestructura, otros de los objetivos más recurrentes son su variabilidad temporal, distribución espacial, factores detonantes y moduladores.

En este apartado se compila una serie de investigaciones sobre el tema de la lluvia intensa que permitirán poner en contexto la actual investigación. Se establece una línea lógica desde lo global, pasando por lo nacional, para luego caer en los trabajos regionales y locales. Se agrupan las reseñas en los temas más interesantes e importantes dentro del riesgo asociado a la lluvia intensa.

1.7.1- Distribución espacial y temporal

Una de las cuestiones de mayor interés es analizar su distribución temporal y espacial para, de esta manera, aplicar estrategias de mitigación y planificar mejor las diferentes actividades

humanas, así como la gestión sostenible de recursos hídricos de una región (Oguntunde et al., 2006). Esto conlleva estudios profundos sobre regiones específicas, utilizando herramientas estadísticas y físico-meteorológicas con preceptos bien identificados sobre las condiciones climáticas.

Siguiendo esta línea, Kunkel y Andsager (1998) analizan la tendencia en eventos de corta duración, entre uno y siete días, que tienen intervalos de recurrencia superior a 1 año, unido al posible vínculo con inundaciones hidrológicas en Norteamérica. Precisamente, la limitante de este artículo radicó en no tomar en cuenta en dicho vínculo los demás factores que modulan las inundaciones como las características físicas del terreno. Una de las cuestiones más interesantes fue la toma diferenciada de umbrales de lluvia intensa para cada duración (1 a 7 días), para cada período de retorno (1,3 y 5 años) y para cada región, lo que potencializa la exactitud de los productos.

Beguiría y Lorente (1999) estudian las precipitaciones extremas en el Pirineo Aragonés occidental a partir de la existencia de patrones de distribución espacial. Destaca el tema del tratamiento estadístico de los valores extremos de la distribución y la necesidad de involucrar el cálculo del período de retorno con el correspondiente análisis de significación. El producto final presenta un mapa de riesgo de precipitaciones extremas apoyado en métodos estadísticos (regresión múltiple) y un sistema de información geográfica (SIG). Un gran inconveniente fue la densidad de la matriz de datos, que afectó el error relativo en el cálculo del período de retorno.

Continuando el trabajo de Kunkel y Andsager (1998), Zhang et al. (2000) hacen una caracterización espacio-temporal de las precipitaciones fuertes sobre Canadá. Una de las novedades más interesantes de la investigación es el método a través del cual se determinó el umbral de lluvia intensa. Los autores seleccionaron un límite superado por un promedio de tres eventos por año. De esta manera aseguraron la toma solo de eventos extremos y al menos un caso en la mayoría de los años. Sin embargo, se considera como limitante la exclusión del impacto socioeconómico en el establecimiento de este umbral, de tal manera que se desconoce si esos valores de precipitación resultan peligrosos o no. Otros de los objetivos fue el cálculo de un período de retorno de 20 años, utilizando el procedimiento descrito por Zwiers and Kharin (1998). Para la variabilidad espacial emplearon el “método

de agrupamiento no jerárquico de K-means”, basado en el algoritmo de Hartigan and Wong (1979), con la idea de agrupar estaciones con similar variancia temporal en las series de intensas lluvias, y así identificar las zonas más propensas. Entre los resultados figura una alta variabilidad interdecadal y una pobre correlación entre los casos extremos y los valores de precipitación en general. Esta investigación resulta un fuerte referente metodológico para la presente investigación debido a las reveladoras y precisas técnicas empleadas.

Kunkel (2003) realizó una actualización de la tendencia de las precipitaciones extremas en dicha zona. Destaca un aumento en la frecuencia de alrededor del 4% por década desde 1920 en los Estados Unidos; resultado acorde con el estudio previo de Karl y Knight (1998) quienes ubicaron a los eventos extremos en el décimo percentil superior en la distribución de precipitación.

En muchas ocasiones, resulta complejo y contraproducente utilizar un umbral fijo para clasificar una lluvia como intensa debido a la multiplicidad de factores que entran en juego. Una alternativa se encuentra en Roy y Balling (2004), quienes revelan siete indicadores para los eventos extremos de lluvia: precipitación total, mayores acumulados de 1, 5 y 30 días, y la cantidad de eventos diarios por encima de los percentiles 90, 95 y 97.5 de todas las precipitaciones. Posteriormente, analizan las tendencias de cada uno de estos parámetros en un total de 129 estaciones. Sus resultados sincronizan con otros tantos en diferentes regiones como Australia (Groisman et al., 2001), islas del Pacífico Sur (Griffiths et al., 2003) y Sudáfrica (Fauchereau et al., 2003), donde se manifiesta una tendencia creciente en la frecuencia de eventos extremos y una relación con el aumento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (posible relación con el cambio climático).

El continente asiático es una zona ampliamente estudiada ya que posee una elevada población, así como un gran potencial científico. Dentro de la vasta literatura se encuentra a Simon y Mohankumar (2004). Estos científicos analizan la variabilidad espacial y las características de las lluvias intensas en el estado de Kerala, India. La metodología que proponen parte de hacer una delimitación espacial de las áreas con características homogéneas de precipitación. Como herramienta estadística utilizan el Análisis Factorial Común (CFA por sus siglas en inglés) tomando como referencia el trabajo de Carter y Elsner (1996), cuyo objetivo es reducir un conjunto de variables observables en término de un

pequeño número de factores latentes (claves). Obtuvieron un total de tres regiones con características únicas en el régimen de precipitación, situación que se correlaciona con las características locales del estado. La limitante de este estudio radicó en la escasa red de estaciones pluviométricas con que se contaba; aunque los resultados no dejan de ser útiles para modelos de mesoescala y escala sinóptica.

Más adelante en el tiempo, pero en este mismo continente, Jung et al. (2011) profundizan en la variabilidad de los valores medios y extremos de precipitación en Corea del Sur. Se conforman un grupo de 16 indicadores. Para los valores medios emplearon el mensual, estacional y anual. Para los valores extremos utilizaron 13 parámetros propuestos por la Comisión de Climatología / variabilidad climática y previsibilidad (CCI/CLIVAR) perteneciente a la OMM, entre los cuales se encuentra el PPL95 (días con precipitación por encima del percentil 95), uno de los indicadores interesantes para la presente investigación. Como técnicas estadísticas emplearon la prueba de Mann–Kendall (Mann, 1945 y Kendall, 1975), para la tendencia lineal y la estadística de prueba de Moran I, explicado en el documento, para el grado de dependencia espacial entre los indicadores. Algunos resultados obtenidos muestran una tendencia positiva en los acumulados anuales de precipitación, sin embargo, dicha tendencia es negativa en los meses de invierno y primavera.

Entre los artículos más novedosos de los últimos años se encuentra el elaborado por Pedersen et al. (2010), quienes encaminan una metodología para resolver uno de los óbices recurrentes, los errores asociados a observaciones muy puntuales. Los autores investigan la variabilidad espacial en un área relativamente pequeña, de apenas 0.25 km², área cubierta por un píxel del radar meteorológico local. El objetivo fue mostrar el margen de error al calibrar dicho radar con un solo pluviómetro (como se venía haciendo). Para ello instalaron nueve pluviómetros en la zona y realizaron mediciones diarias durante dos años. Encontraron que la precipitación acumulada varía significativamente dentro de los eventos individuales con duraciones que varían de 5 minutos hasta 13 horas.

Ferreira et al. (2017) proponen un nuevo enfoque en el análisis de las tendencias temporales de precipitaciones intensas teniendo en cuenta además las características espaciales. Los autores utilizan estimadores para una función de tendencia y para parámetros de valores

extremos, lo que lleva a un procedimiento de homogeneización para luego aplicar procesos estacionarios de valores extremos.

Por su parte, Blanchet et al. (2018) realizan un análisis de la tendencia regional de la lluvia intensa evaluada en 24 horas en el sur de Francia. Dentro de las novedades del estudio está la multiplicidad de escalas, desde escalas puntuales hasta espaciales de 8 km². Otra cuestión para destacar es la evaluación de tres modelos no estacionarios para filtrar la alta variabilidad de los mayores acumulados, donde se introduce una variación temporal del parámetro “ubicación”. A través de diferentes estadígrafos, seleccionan el modelo más adecuado para la zona de estudio. Dentro de los resultados encuentran una tendencia lineal en los máximos de precipitación desde 1985 hasta la fecha, con independencia del relieve al mostrarse tanto en las diferentes cadenas montañosas como en el Valle del Ródano. Esta tendencia lineal a su vez reveló un aumento en 20 años en los máximos anuales de más de 60 mm/día, representando casi la mitad del promedio de precipitación en el sur de Francia.

En el continente americano se encuentran numerosos referentes investigativos, con destaque para Cuba, un país con amplia tradición en la meteorología debido a su posición geográfica y a la colaboración con científicos de nivel mundial

Trusov, I. (1965), en la publicación “Las Precipitaciones en la Isla de Cuba”, obtiene mapas isoyéticos de la lámina de lluvia media máxima y del 1, 5 y 10% de probabilidades, presentados como parte de la Segunda Versión del Mapa Isoyético de Cuba. Esta constituye la primera obra científica que aborda el tema con una sólida base estadístico – matemática y seleccionó una red de 465 pluviómetros. Trusov elaboró un conjunto de importantes conclusiones sobre el comportamiento de las lluvias máximas que aún conservan validez.

Unos años después, Koshiasvili, B. (1972) pudo identificar diferencias en el comportamiento de las lluvias máximas después de los meteoros productores de meteoros, principalmente entre los de origen convectivo local y los de los ciclones. Se relaciona con la duración de las lluvias intensas, la intensidad y su variabilidad dependiente del tiempo, y el tiempo distribución de las lluvias. También obtuvimos curvas iniciales de intensidad-duración-frecuencia para dispositivos aislados en diferentes regiones de Pinar del Río, La Habana (actualmente Artemisa y Mayabeque), Oriente e Isla de la Juventud y presenta una nueva versión de mapa isoyético de la lámina de lluvia del 1% de probabilidad.

Siguiendo esta metodología, Riazanov, V. (1975) estudió las intensidades de las lluvias máximas en el periodo seco. Riazanov obtuvo curvas de Intensidad-Duración y Frecuencia, pero estas no coincidieron con las obtenidas por Koshiasvili (1972), señalando que se debió fundamentalmente a la diferencia que existe entre la duración de las lluvias que ocurren en el periodo seco y húmedo.

En el estudio de las precipitaciones significativas en Cuba destaca el trabajo desarrollado por Eduardo Planos. En 1999 analiza para cada mecanismo generador de grandes precipitaciones, las relaciones espacio temporales para las regiones occidentales y centrales, investigación que amplió en el 2000 para la subregión Camagüey - Maniabón y región oriental. Posteriormente en 2004, junto a otros autores, elaboró una serie de mapas de peligro de ocurrencia de lluvia intensa incluyendo un mapa integral de peligro. Cabe destacar que para esta investigación utilizó el criterio de intensidad de acumulados mayores o iguales a 50 mm en 24 horas. Prosiguió en 2011, donde caracteriza la distribución espacial y temporal de las grandes precipitaciones, según las causas del evento pluvial y los cambios observados en su comportamiento; así como el análisis del peligro por lluvias intensas

Robledo y Penalba (2009) se adentran en la variabilidad espacial de la precipitación en el sudeste de Sudamérica con énfasis en los extremos a partir de varios umbrales, dándole continuidad al estudio de Haylock et al. (2005). Nuevamente, un aspecto a destacar son los índices utilizados para el estudio: 1) porcentaje de días con precipitación por encima de varios umbrales (de aquí en adelante PE01 para 0,1mm, PE10 para 10mm y PE75 para el percentil 75), y 2) la intensidad media diaria, evaluada en milímetros por día (mm/día) por encima de los umbrales mencionados (IP01 para 0,1mm, IP10 para 10mm y IP75 para el percentil 75). El cálculo de dichos índices para cada estación permitió definir las zonas “calientes”, así como tendencias anuales del total y de los extremos de precipitación.

Romanazzi (2014) estima la Precipitación Máxima Probable (PMP), otra técnica para el estudio de este fenómeno, con un mayor grado de simplicidad, pero igualmente efectivo. Para ello establecen una base de datos de máximos anuales de precipitación diaria.

México no se queda atrás en el tema, apoyándose en la vasta red de investigadores alrededor de todo el país, creando y aplicando técnicas novedosas. Los trabajos en este territorio sortean la alta complejidad de la orografía mexicana.

Maderey (1980) estudia el comportamiento espacial y temporal de la máxima intensidad de precipitación en el Valle de México. Para ello calculó máximos anuales de duraciones de 5 y 60 minutos y valores esperados de duraciones de 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos en periodos de retorno de 10 y 25 minutos, 50 años y 100 años. Adicionalmente, se han resuelto las zonas donde se dan los valores más altos. Se calcularon periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años mediante el método de Gumbel y se generaron mapas de peligrosidad a la máxima intensidad esperada en cada caso. La investigación fue centrada a la utilidad hacia el manejo y diseño de obras hidráulicas, por lo cual dichos periodos de retorno se adecuaban, sin embargo, se considera que se deban agregar los periodos de 2 y 5 años en este tipo de investigaciones. Como conclusiones destaca la interdependencia de los valores de precipitación máxima y media con la orografía, con valores que aumentan a medida que crece la altitud. Además, se establece el impacto de la mancha urbana en el aumento de la frecuencia e intensidad de la lluvia, asociado a factores como el efecto ciudad en las temperaturas (favoreciendo los procesos convectivos) y la contaminación atmosférica (aportando núcleos de condensación).

Una técnica estadística muy útil sobre todo en la gestión de obras de ingeniería es el indicador de Precipitación Máxima Probable (PMP). Linsley et al. (1977) resumen su importancia al manifestar que siempre será conveniente ubicar los servicios públicos esenciales y las carreteras importantes arriba del nivel máximo probable de inundación. Utilizando este indicador, Campos (1998) realiza un estudio estadístico profundo sobre la precipitación máxima para el estado de San Luis de Potosí. Para la estimación de la PMP explica y utiliza dos criterios: el método estadístico de D.M. Hershfield y la Estimación Probabilística (basado en varios modelos como la Distribución de Gumbel, la General de Valores Extremos y la Log-Pearson tipo III). Otra novedad en su metodología es el contraste y análisis de los resultados para las tres principales zonas geográficas del área: altiplano, zona media y huasteca del estado de San Luis Potosí. A pesar de la antigüedad, este artículo constituye un referente metodológico importante a tener en cuenta debido a la evaluación de técnicas estadísticas y a la contextualización del asunto en un marco estatal.

Una teoría alarmante para los urbanistas, trabajadores de planificación física, para todos en general, se refiere al impacto de las ciudades en el régimen de lluvias. En México se evidencia con Jáuregui (2001), el cual examina la variabilidad espacial y temporal de los acumulados

de lluvia superiores a 20 mm por día y la posible influencia sobre estos de la Ciudad de México. El período de estudio fue de 1961-1996 y se enfatizó, en los últimos 4 años, en los registros superiores a 45 mm por día. El estudio revela un aumento en la frecuencia de estos eventos extremos, concluyendo que: “...este incremento en la frecuencia de eventos extremos de lluvia podría estar relacionado con el aumento en la extensión de la ciudad que proporciona energía adicional (eg la isla de calor) para el desarrollo posterior de las nubes convectivas que cruzan la ciudad.” (p. 333). Las frecuencias más altas se encontraron en los suburbios del sur y oeste de la ciudad debido a efectos topográficos.

Una de las metodologías con mayor valor estadístico para el estudio de la variación espacio-temporal de la precipitación en México es propuesta por Díaz et al. (2011). Las técnicas utilizadas son la prueba de bondad de ajuste y cálculo de parámetros de la distribución gamma, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés), desarrollado por Mckee et al. (1993), así como una evaluación de métodos de interpolación. Luego de analizados los resultados, recomiendan el uso del SPI por su sencillez, precisión y practicidad en la estimación de intensidad, frecuencia y duración de la variabilidad pluvial. La técnica de interpolación óptima para la zona de estudio resultó la *thin plate smoothing spline*, al tener el menor cuadrado medio del error. Debido a la profundidad del análisis y a la adecuación de técnicas estadísticas al territorio nacional de México, este trabajo constituye un importante referente metodológico para la presente investigación.

En ese mismo año, Sánchez (2011) centra su investigación en las implicaciones, como factor de riesgo, que tiene las precipitaciones extremas en la evaluación y zonificación de los procesos de remoción en masa en la ciudad de Tampico. Similar a estudios anteriormente señalados, el autor utiliza técnicas estadísticas como Índice Modificado de Fournier y Ley de Probabilidad de Gumbel para las estimaciones del impacto del fenómeno y para períodos de retorno. Además, a la hora de indagar en la peligrosidad, busca relacionar datos pluviométricos, geomorfológicos y de población a través de un SIG. De esta manera realiza la caracterización espacio-temporal de la lluvia intensa. El autor reconoce deficiencias derivadas de la disponibilidad de datos iniciales, sin embargo, se considera que este trabajo tiene un elevado valor metodológico y sobre todo novedoso, al introducir un tema tan importante como lo es la remoción en masa en los estudios de riesgo y su relación con la variabilidad de la precipitación extrema.

Gutiérrez (2011) resume algunas propuestas para México en cuanto a umbrales para clasificar los episodios de lluvia como fuertes. Examinar el periodo de recurrencia de las lluvias torrenciales en Tamaulipas. Menciona las tres categorías propuestas por Charles (2000) en función de si el valor acumulado durante cinco días consecutivos supera el promedio anual en 5, 10 o 15. Otro criterio es utilizado por Haylock y Nicholls (2000), proponiendo tres índices: el número de eventos por encima de un extremo umbral (frecuencia extrema); la intensidad promedio de precipitaciones de eventos extremos (extrema intensidad), y la proporción de precipitación total de eventos extremos (extrema por ciento). Carvalho et al. (2004) Concepto de promedio acumulado de 16 litros por día o más por año. Gutiérrez (2011) luego examinó el período de recurrencia de las lluvias torrenciales en Tamaulipas. Se requiere un período de 15 años como condición temporal para homogeneizar la serie temporal. La función de distribución de Gumbel anterior se utiliza para calcular el período de retorno, los cuales resultan muy interesante la cartografía de las lluvias torrenciales (máximas en 24 horas) para el estado de Tamaulipas con un periodo de retorno de diez años, para el mes de septiembre, considerado como el más lluvioso.

Además de lo práctico y útil de la investigación, hay que mencionar la adecuada estrategia para solucionar la baja resolución espacial de los datos en la porción perteneciente a la Sierra Madre Oriental, a través del método de interpolación espacial Kriging Universal. De esta manera el autor logra un raster de 1 km² de resolución para toda el área, apoyándose en el programa Arc-Map 9.2.

1.7.2- Patrones Atmosféricos

El pronóstico de la lluvia intensa resulta un constante reto para los meteorólogos debido a los múltiples factores que intervienen, sobre todo de escala local. Sin embargo, tener establecido los ambientes sinópticos que favorecen la formación de este fenómeno peligroso en determinado lugar, representa una herramienta útil para los pronosticadores, aumentando la alerta en los momentos donde estén imperando dichas configuraciones.

Vinculado con este tema, Martínez et al. (2008) logran una clasificación de los patrones atmosféricos asociados a eventos de lluvia intensa en las zonas mediterráneas de Francia y España, dando así continuidad a una serie de estudios similares en el Mediterráneo como

Houssos y Bartzokas (2006) y Lana et al. (2007). La base de datos fue de siete años y la resolución espacial de 0.5° . Como casos de lluvia intensa toma los días con acumulados por encima de los 60 mm en 24 horas registrados en al menos cuatro estaciones. Los campos seleccionados fueron altura geopotencial en 1000 hPa y 500 hPa y la temperatura en el nivel de 850 hPa, tomados a las 12 UTC de cada caso de estudio. Luego, para definir los patrones, utilizan la técnica de Análisis de Componentes Principales y el Análisis de Clúster. La primera con el objetivo de reducir el elevado número de variables y la segunda para agrupar las configuraciones. Finalmente obtienen y describen un total de 8 configuraciones sinópticas.

Recientemente se tiene un referente importante en el trabajo de Feloni et al. (2017). El objetivo general fue el análisis de eventos de fuertes precipitaciones ocurridos en la región de Ática durante el período 2007–2013, junto con la determinación de sus características sinópticas según la temporada y su impacto correspondiente. Estos eventos fueron seleccionados de acuerdo con dos criterios; la ocurrencia de descarga eléctrica (información que se obtuvo de la Red de Sensores de Precisión de Relámpagos de Precisión del Servicio Meteorológico Nacional Helénico (HNMS-PLN)) y la severidad de la lluvia, proporcionada por la red de lluvia del Observatorio Hidrológico de Atenas (HOA). Las configuraciones de valores medios y anomalías sinópticas diarias de los casos de lluvia intensa fueron tomadas del National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research (NCEP–NCAR). A su vez, indagaron en las configuraciones de índices de inestabilidad específicos, durante los eventos de lluvia examinados (Índice de Levantamiento LI, Índice K y Energía Potencial Convectiva Disponible CAPE). La principal virtud de esta investigación radicó en el análisis multiescalar del fenómeno, proporcionando una herramienta más completa en la comprensión del fenómeno.

Marco et al. (2018) desarrollan un estudio similar para la región de Murcia, España. Debido a las condiciones locales, suben el umbral de lluvia intensa a 100 mm/día, y toman solo los casos donde se registró esos valores en 6 o más estaciones. La técnica empleada continuó siendo el Análisis de Componentes Principales. Así, obtuvieron un total de cinco patrones sinópticos y les permitió identificar las zonas más propensas a sufrir eventos de precipitación intensa (el Litoral Este y la zona Norte).

En América, Orbe y Barcia (2007) identificaron los patrones sinópticos que producen eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba, en el período 1979-1999. Trabajo continuado por González (2014) determinó las distintas configuraciones sinópticas que generan lluvia intensa en el período poco lluvioso desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo, utilizando una base de datos que va desde 1980 hasta el 2012. Logró definir un total de seis configuraciones y diez subgrupos; siendo la principal los frentes fríos o frentes casi estacionarios en superficie, acompañados en niveles medios de una onda polar profunda y bien estructurada, además de un flujo del suroeste en niveles altos. Además de los mapas sinópticos en superficie, 850, 700, 500 y 200 hPa, analizó la temperatura en el nivel de 500 hPa y el viento en 200 hPa. Sin embargo, no se analizaron variables como la divergencia, la vorticidad, la velocidad vertical, mientras que la humedad solo fue estudiada en 700 hPa, lo que representa una limitante acotada al trabajo. Seguidamente, Pérez (2010) complementó el análisis con el período lluvioso utilizando similar metodología.

1.7.3- Oscilaciones Atmosféricas

La variabilidad climática, sin considerar siquiera el hipotético cambio climático, destaca como un tema recurrente por las implicaciones en las condiciones promedios de una región. Estas variaciones (sin que conlleve a un cambio) están dadas mayormente por oscilaciones de gran escala, las cuales producen a su vez fenómenos de teleconexión a lo largo de todo el planeta. A continuación, se citarán algunas investigaciones que abordan el vínculo de la precipitación extrema con las oscilaciones de gran escala MJO y ENSO.

Charles (2000) investiga la ocurrencia de precipitación intensa en California, Estados Unidos y el efecto modulador de la MJO. Las variables representativas de la MJO utilizadas fueron la radiación de onda larga saliente (ORL) y la componente zonal del viento en 200 hPa y 850 hPa en el período de 1979-1996. Se obtuvo que la frecuencia de lluvias extremas es más común cuando la actividad tropical asociada con la MJO es alta. A su vez, existe una preferencia, aunque ligera, por un mayor número de eventos cuando se encuentran anomalías convectivas en el océano Índico. Sin embargo, en cuanto a la amplitud, no hay relaciones directas y sistemáticas de la MJO con el número de eventos extremos. El autor no pasa por alto el impacto del ENSO en estos valores extremos con una pequeña revisión bibliográfica; sintetiza lo siguiente: “Mientras que algunos estudios indican cierta modulación en la lluvia

de California por ENSO, otras investigaciones no encuentran una asociación clara. Parece que, dado que los episodios de ENOS tienen características variables en la estructura espacial, la intensidad y la duración, diferentes eventos de ENSO pueden impactar la precipitación sobre el estado de California de manera diferente.

En el continente asiático, Jiang et al. (2003) buscan un posible vínculo entre patrones circulatorios de larga escala con la precipitación intensa de primavera durante fenómenos ENSO activo e inactivo en Taiwán. Para examinar el efecto del ENSO sobre la lluvia regional en diferentes estaciones, se analizaron los coeficientes de correlación entre la lluvia mensual sobre Taiwán y la temperatura superficial del mar en la región Niño-3 desde el año anterior hasta el año concurrente. Para considerar los posibles efectos de los cambios interdecadales sobre el Pacífico a fines de la década de 1970, se realizó una transformada Wavelet (WT) para revelar la evolución de la relación entre el Niño-3 SST y la lluvia de primavera en Taiwán. La Transformada Wavelet puede ser usada para representar características de interés localizadas en una señal (en una serie de tiempo), lo cual la convierte en un candidato ideal para la extracción de características en contextos de clasificación. Los resultados revelan una correlación positiva entre la fase fría del ENSO (fenómeno de La Niña) y las lluvias de primavera en el oeste de Taiwán. La Niña aumenta el flujo del suroeste en la baja tropósfera sobre Taiwán, provocando un aumento de la humedad y la consecuente reacción en las precipitaciones.

Un estudio a escala global de la relación de la MJO con eventos de precipitación extrema es llevado a cabo por Jones et al. (2004). En primer lugar, profundiza en la propagación hacia el este de la MJO y las ocurrencias globales de precipitación extrema. Seguidamente resuelve el grado en que un modelo de circulación general, con una representación relativamente realista de la MJO, simula su influencia en los extremos. Y finalmente, analiza una posible modulación de la OMJ sobre la previsibilidad potencial de los eventos extremos de precipitación. Como dato representativo de la MJO se utilizó la ORL con una resolución de 2.5° y para la precipitación emplearon el Global Precipitation Climatology Project (GPCP) con igual resolución espacial. Entre los resultados concluyen que, a escala global, el número de eventos extremos durante situaciones de MJO activas es aproximadamente un 40% mayor que en las fases inactivas de la oscilación, en los lugares donde la influencia de MJO es estadísticamente significativa. Dentro de las zonas con mayor vínculo se encuentra el

Pacífico noroccidental (incluyendo el noroeste de México), donde además se comprobó una optimización en la efectividad de pronósticos de eventos extremos durante la fase activa de la MJO.

En Australia, Ghelani et al. (2017) analizan la relación entre la variabilidad de la precipitación (haciendo énfasis en los valores extremos) con las oscilaciones MJO y ENSO. Entre los resultados, sobresale que la magnitud de la respuesta de la lluvia a la MJO durante ENSO positivo (El Niño) es estadísticamente significativa cuando se prueba contra todo el período de estudio, así como contra las variaciones que normalmente se esperarían en El Niño. Igual que en el estudio anterior, restringen el estudio a la época húmeda del año (de noviembre a abril), lo que deja abierta una ventana de posibilidades para un análisis similar en la época “seca” en el hemisferio sur.

Un aspecto cardinal previo a este tipo de estudios es definir con cuales indicadores de las oscilaciones se van a abordar. Agilan y Umamahesh (2018) proponen una metodología interesante al definir el mejor indicador del ENSO para modelar los extremos de lluvia en la India. Obtienen que el Índice de la Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés) resulta el índice más apropiado; se experimenta un 42% de aumento promedio, con respecto a otros índices, en el coeficiente de correlación entre la lluvia extrema de la temporada del monzón y el ciclo ENSO. Sin embargo, este resultado no debe tomarse como paradigma en todas las regiones; impera aplicar esta metodología tomando en cuenta los aspectos característicos de cada localización geográfica.

Recientemente, Pourasghar et al. (2019) examinan la variación intraestacional de la precipitación sobre Irán debido a la Oscilación Madden-Julian (MJO), el Dipolo del océano Índico (IOD) y El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El período de estudio fue de 1961 a 2015 y se centró en la estación húmeda, de octubre a mayo. Los resultados indican que la respuesta de la lluvia de la estación húmeda de Irán a la MJO se ve más afectada por las variaciones atmosféricas a gran escala asociadas con el IOD que por ENSO. El IOD negativo (positivo) fortalece (suprime) la relación MJO-lluvia en las fases MJO húmeda y seca. La variación en las variables atmosféricas (humedad relativa y velocidad vertical) indica más (menos) humedad y movimiento hacia arriba (hacia abajo) que aumenta (disminuye) la precipitación en fases MJO húmedas (secas) durante el IOD negativo. La relación de lluvia con el MJO

durante el IOD negativo es estadísticamente significativa, mientras que la relación durante el IOD positivo es débil; y no se encuentra una relación significativa durante ninguna fase de ENOS.

El clima de México, un país con gran porción de territorio en los trópicos y con costas hacia el océano Pacífico, se vuelve dependiente de estas oscilaciones.

Magaña et al. (1998) hacen un resumen de los aspectos generales del fenómeno El Niño y sus impactos en México. Una de las relaciones más enfatizadas es con el régimen de precipitación. Los autores destacan que, en invierno, durante un evento Niño, el chorro subtropical baja en latitud, aumentando la frecuencia de frentes fríos y la consecuente producción de lluvia en el norte y centro del país. En verano ocurre lo contrario, disminuyen las precipitaciones debido a que la línea intertropical de convergencia del Pacífico del Este (principal fuente de humedad) se mantiene más cerca del Ecuador. Tal efecto en verano se revierte con la presencia de La Niña, aumentando los acumulados anuales de precipitación en gran parte del territorio mexicano. Este artículo tiene un elevado valor en la prevención de riesgo asociados al ENSO, aunque no se menciona una relación con los eventos extremos de precipitación.

Méndez et al. (2007) examinan los posibles vínculos entre los eventos ENSO y la variabilidad de las precipitaciones registradas en México. Además, identificarán patrones espacio-temporales de precipitación asociados a fenómenos ENSO y determinarán cuantitativamente el impacto de ENSO en la precipitación mensual. Usando 762 estaciones distribuidas a lo largo del país entre 1921 y 2005, encontraron un aumento de la precipitación en las regiones costeras de latitudes medias y altas durante los meses de febrero, noviembre y diciembre, concluyendo que existe una correlación negativa hacia el sur

Cerano et al. (2011) continúa el análisis ENOS de la precipitación, aunque se especializa en la cuenca del río Nazas, que forma parte de los estados de Coahuila y Durango. Concluyen que las estaciones seca y húmeda registradas en la cuenca alta del Nasas durante el siglo XX fueron influenciadas por la presencia de este fenómeno tanto en periodos cálidos (El Niño) como fríos (La Niña).

Estas investigaciones anteriormente citadas demuestran el amplio espectro de estudios relacionados con la lluvia intensa como fuente de peligro. Salta a relucir las variadas metodologías y técnicas estadísticas para abordar las temáticas, junto a un grupo de limitaciones (insuficiencia de datos, aspectos locales insoslayables) que permiten un mejor enfoque a la hora de adentrarse en este tema tan importante para la sociedad en general.

2- Metodología y Técnicas de Investigación

La metodología propuesta en este trabajo de investigación es parte del paradigma (dentro de la geografía) de la geografía cuantitativa. propuesta por Burton et al. (1978) se ha convertido en un paradigma fundamental para las tecnologías digitales actuales, especialmente los sistemas de información geográfica. “La información obtenida nos permite medir la escala del problema socioeconómico y ambiental analizado, identificar patrones de distribución espacial y utilizar los elementos obtenidos para facilitar la delineación de una determinada política pública o estrategia. soluciones a buscar” (Buzai y León, 2015, p.47).

En la Figura 3 se muestra el diagrama general de flujo que describe la metodología empleada. Con vistas a representar una herramienta para los instrumentos de gestión del riesgo, se analiza el riesgo potencial asociado a las precipitaciones. El riesgo será enfocado en el peligro, la exposición y la vulnerabilidad en el estado de Jalisco. Para el peligro, se indaga en la variabilidad climática y la distribución espacio-temporal de los acumulados máximos anuales de precipitación, a partir del impacto de oscilaciones de gran escala y del cálculo de períodos de retorno respectivamente. Además, se incluye un análisis del ciclo anual de la precipitación en el estado. Mientras que la exposición física y la vulnerabilidad se centrarán en la variable población y sus subcategorías.

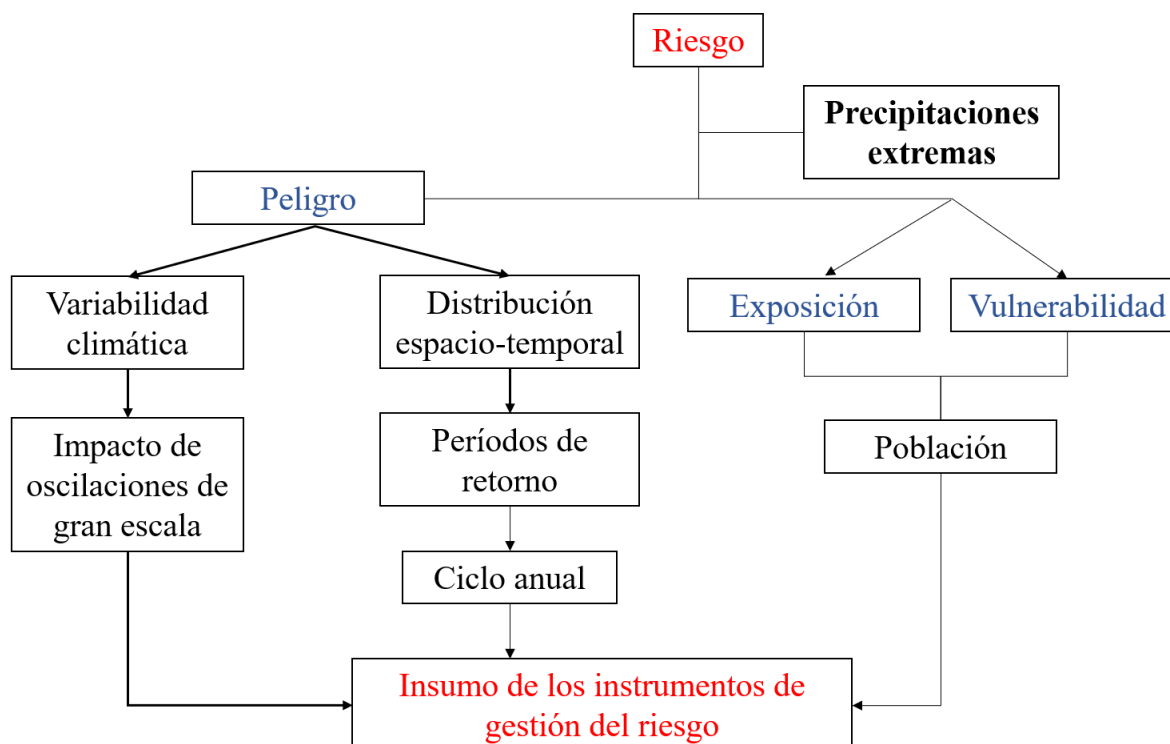


Figura 3: Insumo para los instrumentos de gestión del riesgo. Los colores hacen referencia a los objetivos específicos.

La investigación será de tipo adaptativa, donde se tomarán una serie de materiales y métodos ya preestablecidos para aplicarlos en un lugar en específico (Jalisco), o sea, adaptar la tecnología ya existente a las condiciones locales del territorio. Por su parte, se empleará un método no experimental debido a que las variables independientes (la precipitación, la población) no son manipuladas ni controladas. Entre las subcategorías de este método se abordarán los siguientes análisis: exploratorio (se indaga en las variables que intervienen en el riesgo potencial), descriptivo (se aplicarán una serie de estadísticas descriptivas a la muestra de datos), correlacional (se realiza un análisis de funciones empíricas ortogonales donde se arrojan valores de correlación), causal (se indaga en la posible influencia de oscilaciones atmosféricas, “causa”, en la génesis de lluvias extremas, “efecto”) y de tendencia (se buscan los períodos de retorno de lluvias máximas, así como un análisis de espectros de frecuencia).

2.1- Datos

Se crea una serie de tiempo como punto de partida para un procedimiento sistemático. Se crea una base de datos de precipitación diaria de la red de estaciones climatológicas

convencionales perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). De todas estas estaciones, se seleccionaron las estaciones con una desviación total del registro menor a 25% para el período 1981 a 2018 (basado en Díaz et al., 2011) y que cumplieron con los criterios climatológicos. Luego se crea una serie temporal para cada estación y los máximos anuales se acumulan en 24 horas.

Luego de confeccionada la base de datos, se procede a un análisis de contenido a partir de la variabilidad temporal y espacial de los casos de lluvia intensa. En el primer análisis, se utilizan estadígrafos descriptivos para determinar períodos decenales, mensuales y anuales de mayor y menor frecuencia temporal. A su vez, siguiendo la metodología aplicada por Sánchez (2011), se analiza como la distribución temporal de las precipitaciones influye en la agresividad climática por lluvias, responsable de peligros geomorfológicos y de erosión de suelos. Para ello se utiliza el Índice Modificado de Fournier.

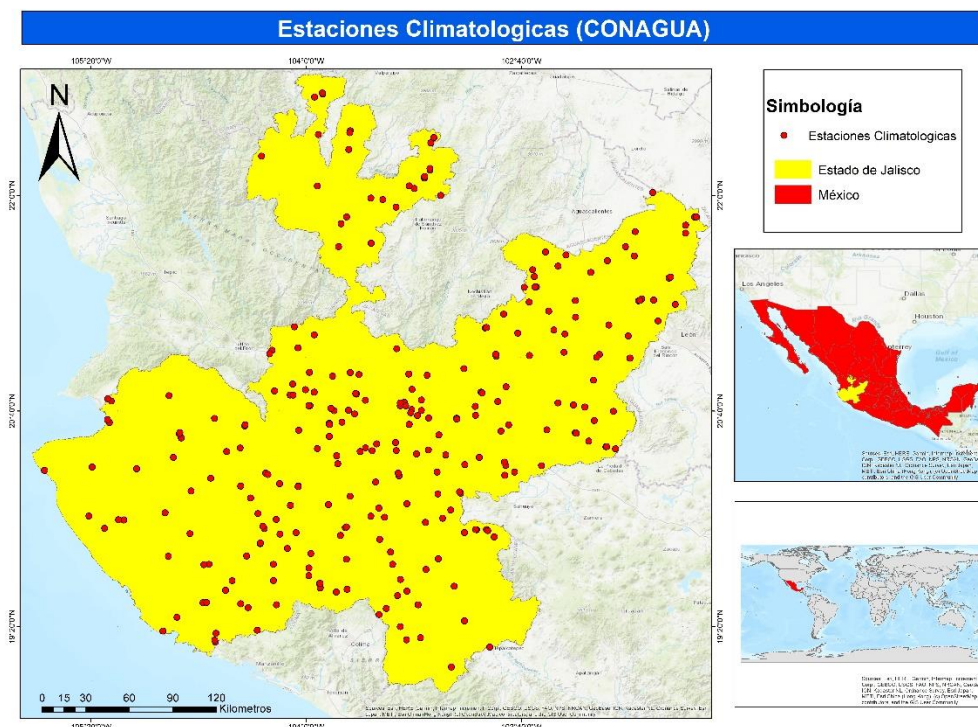


Figura 4: Localización de las estaciones climatológicas pertenecientes a CONAGUA. Fuente: elaboración propia en base a cartografía del INEGI.

2.1.1- CHIRPS

Uno de los obstáculos recurrentes en este tipo de estudios es la disponibilidad de datos con adecuada resolución espacial y temporal. En respuesta a esta situación, los productos satelitales han sido insumo de numerosas investigaciones (Palharini et al., 2020, Wang et al., 2021, Roca y Fiolleau, 2020).

Entre las bases de datos más aceptadas a nivel mundial se encuentra el CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations). Uno de sus puntos fuertes es el combinar datos de sensores satelitales con estaciones *in situ*, permitiendo así una corrección con datos reales (Funk et al., 2015). Para el caso del territorio mexicano, este producto muestra un comportamiento aceptable y su uso ha sido recomendado como una base de datos auxiliar en los estudios relacionados con sequías y condiciones promedio (Perdigón et al., 2017, Morales et al., 2021). Sin embargo, existen muy pocas investigaciones que documenten investigaciones que caractericen los productos del CHIRPS para los valores máximos de precipitación en una escala regional (León et al., 2021).

CHIRPS resulta de la colaboración entre el Servicio Geológico de los EEUU (USGS), the U.S. Agency for International Development (USAID), the USAID Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET), the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). CHIRPS es producto de la combinación de diferentes fuentes: the monthly precipitation climatology (CHPCLim), quasi-global geostationary thermal infrared (IR) satellite observations, the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), atmospheric model rainfall fields from the NOAA Climate Forecast System, version 2 (CFSv2), y datos de estaciones *in situ* provenientes de los servicios meteorológicos nacionales (Funk et al., 2014; Funk et al., 2015).

Posee una resolución espacial de 0.05 x 0.05 grados, con una cobertura global de 50N-50S en todos los meridianos. En cuanto a la resolución temporal, se establecen datos por día, péntadas (6 pentads = 1 calendar month, each of first 5 pentads in a month have 5 days), décadas (a dekad = sum of 2 pentads, there are 3 dekads in a calendar month) y mensuales, con productos desde 1981 hasta la actualidad. Los datos están disponibles a partir de la tercera semana del siguiente mes, aunque para México se pueden obtener desde el segundo día después de cada péntada.

Con este antecedente, se considera el uso del CHIRPS para abordar los capítulos dos y tres, los cuales demandan una mayor densidad de datos. Sin embargo, toda base de datos derivada de productos satelitales requiere un análisis previo de la efectividad, especialmente en los casos máximos o extremos.

En este sentido, se sigue la metodología comúnmente usada, la cual se centra en la correlación entre estaciones *in situ* (CONAGUA), como referencia del valor real (aunque no están exentas de errores, sobre todo humanos, y previamente es necesario validar sus registros) y los productos satelitales que se intentan evaluar (CHIRPS) (Wang et al., 2020, Liu et al. 2019, Hénin et al., 2018, Fang et al., 2019, Baez et al., 2019). Se selecciona un valor de CHIRPS para cada registro de las estaciones de referencia; esto permite obtener series de tiempo homogeneizadas para luego proceder con la comparativa punto a punto.

Se emplean los datos diarios y péntadas en el período de estudio. Para establecer comparaciones con las estaciones *de referencia*, se utilizaron los píxeles del CHIRPS que contenían a dichas estaciones. El valor final que representa a CHIRPS fue obtenido a partir de una interpolación de medias ponderadas (Burrough y McDonnell, 2000) entre cada uno de los vértices del pixel y la ubicación de la estación *in situ*.

Se toman cuatro medidas estadísticas para la evaluación de eficiencia de la base de datos CHIRPS: the bias (BIAS), the relative bias (RBIAS), the root mean squared error (RMSE) y el coeficiente de determinación (R2), indicadas en las ecuaciones 1-4. Estos estadígrafos han sido ampliamente utilizados en investigaciones de este corte, mostrando resultados esclarecedores (Sharifi et al., 2016, González et al., 2017).

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)$$

$$RBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^N Y_i} * 100$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - F_n(x)_i)^2}$$

N es el total de datos, X_i datos CHIRPS, Y_i datos *in situ*, F_n es la frecuencia de X y F es la frecuencia de Y.

El BIAS indica si la base de datos sobreestima (>0) o subestima (<0) los indicadores en cuestión, mientras que el RBIAS evalúa el sesgo sistemático y el valor 0 es el óptimo en ambos casos. Por su parte, el RMSE representa el error promedio, aunque no muestra la dirección de la desviación. Por último, el R^2 es una medida de correlación entre dos series temporales, tomando valores entre -1 y 1. Los negativos señalan una correlación inversa y los positivos una correlación directa; mientras más alto sea el $|R^2|$ mayor será la correlación.

Dichos estadígrafos se aplican a una serie de índices (Tabla 1), los cuales están en correspondencia con las recomendaciones de la Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), perteneciente a la World Climate Research Programme (WCRP) (<https://www.clivar.org/>), para el muestreo y estudio de los cambios asociados a las precipitaciones extremas.

Tabla 1: Índices de precipitación extrema seleccionados.

ID	Nombre	Definición	Unidad
MR1	Precipitación máxima 1 día	Máxima precipitación anual en un día	mm
MR5	Precipitación máxima 5 día	Máxima precipitación anual en cinco días	mm
CWD	Días consecutivos con lluvia	Mayor cantidad de días consecutivos húmedos	días
DOP95	Días sobre el percentil 95	Días con precipitación sobre el percentil 95	días
SDII	Índice de intensidad diaria	Lluvia total dividida por el número de días húmedos	mm/días

2.2- Períodos de retorno

Una técnica recurrente en el estudio de las precipitaciones extremas y la preparación ante desastres es el cálculo de períodos de retorno. Son aproximaciones estadísticas cuyas frecuencias se teorizan a partir de muchos registros previos (Begueria y Lorente, 1999). Este método de una base de datos establecida se utiliza en este estudio.

Las estimaciones del período de retorno están destinadas a ajustarse para distribuciones de probabilidad específicas. En este caso usamos la función de distribución de Gumbel (Gumbel, 1911). Este es el ajuste máximo recomendado para variables como la precipitación y es ampliamente utilizado en el territorio mexicano (Maderey, 1980; Campos, 1998; Sánchez 2011; Gutiérrez et al. 2011). Esta función se define como la probabilidad de que ocurra un evento de lluvia fuerte (Ecuación 1) en un período de retorno dado utilizando una serie de medidas amplia (38 años en este estudio).

$$P(\varepsilon \leq x) = F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}} \quad (1)$$

Donde:

$P(\varepsilon \leq x) \rightarrow$ probabilidad de no excedencia,

$F(x) \rightarrow$ frecuencia.

Los parámetros d y u (ecuaciones 2 y 3 respectivamente) se derivan de las series temporales de cada estación y dependen de la media (m) y de la desviación estándar (σ):

$$u = m - 0.450047 * \sigma \quad (2)$$

$$d = 1/(0.779696 * \sigma) \quad (3)$$

La probabilidad de excedencia se calcula como:

$$P(\varepsilon \geq x) = 1 - F(x) \quad (4)$$

y el período de retorno (T) queda:

$$T = 1 / [1 - F(x)] \quad (5)$$

Luego, sustituyendo las ecuaciones 5, 4, 3 y 2 en 1, y despejando x , se obtiene el valor mínimo de precipitación que se espera ocurra, en al menos una ocasión, en el período T (ecuación 6).

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d} \quad (6)$$

Para comprobar la eficacia de este método, realizamos una prueba de ajuste preliminar utilizando el coeficiente de determinación R^2 (Ecuación 7). Un valor de 0,9 se considera el límite de evaluación satisfactoria.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - \overline{F_n(x)_i})^2} \quad (7)$$

Donde:

$n \rightarrow$ número de registros de cada estación,

$F_n(x)_i \rightarrow$ frecuencia real acumulada,

$\overline{F_n(x)_i} \rightarrow$ frecuencia real acumulada promedio,

$F(x)_i \rightarrow$ frecuencia teórica acumulada.

Luego se calculan estimaciones de períodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años (no se evalúan lapsos superiores por la ausencia de practicidad debido a la realidad cambiante del fenómeno estudiado y a la longitud de la serie de referencias). Luego se realiza un análisis exploratorio de los datos para buscar el ajuste óptimo de los parámetros para la interpolación posterior. Estas pruebas se derivan del complemento Geostatistical Analysis en la versión 10.7 del software ArcMap.

Utilizando estas referencias relativas a la distribución espacial de los datos, se realiza la interpolación de la precipitación para cada período utilizando una técnica simple de kriging. De esta forma, se crea un mapa de amenazas de precipitación máxima en un período de 24 horas.

2.3- Variabilidad climática

Esta sección se enfoca en el impacto potencial del evento El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre el cambio climático para la precipitación máxima dentro del estado. La base de datos elegida asume eventos de precipitación que superan el valor del percentil 95 (Roy y Balling, 200) para cada estación, y que los eventos acumulados que superan este índice relativo son eventos excepcionales. Así, tenemos una serie de tiempo que contiene los totales anuales de precipitación extrema para cada estación.

Luego se realiza un análisis espectral de estas series de años para identificar las frecuencias más energéticas y encontrar su relación con las periodicidades típicas de ENOS. Propuesto por Jenkins y Watts (1969), este análisis utiliza la transformada de Fourier (TF), un algoritmo que transforma una serie del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa. Esta técnica descompone las distintas frecuencias que componen la serie en ondas seno y coseno con sus respectivas amplitudes y fases. Esta fórmula de descomposición (Ecuación 8) se implementa en Matlab con un nivel de confianza del 95%.

$$S_x(\omega) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi\omega t} dt = \int_0^T x(t)\cos(2\pi\omega t)dt - i \int_0^T x(t)\sin(2\pi\omega t)dt = a_x(\omega) - ib_x(\omega), \quad (8)$$

Donde:

$x(t)$ → serie de tiempo

T → longitud de la serie

ω → frecuencia

Por razones prácticas, esta sección utiliza solo una estación por región (según la regionalización oficial actualizada en 2014 por el INEGI), útil para el trabajo operativo del Servicio Meteorológico Nacional (Figura. 5). Se seleccionan estaciones equidistantes. Es decir, se conserva la distribución espacial.

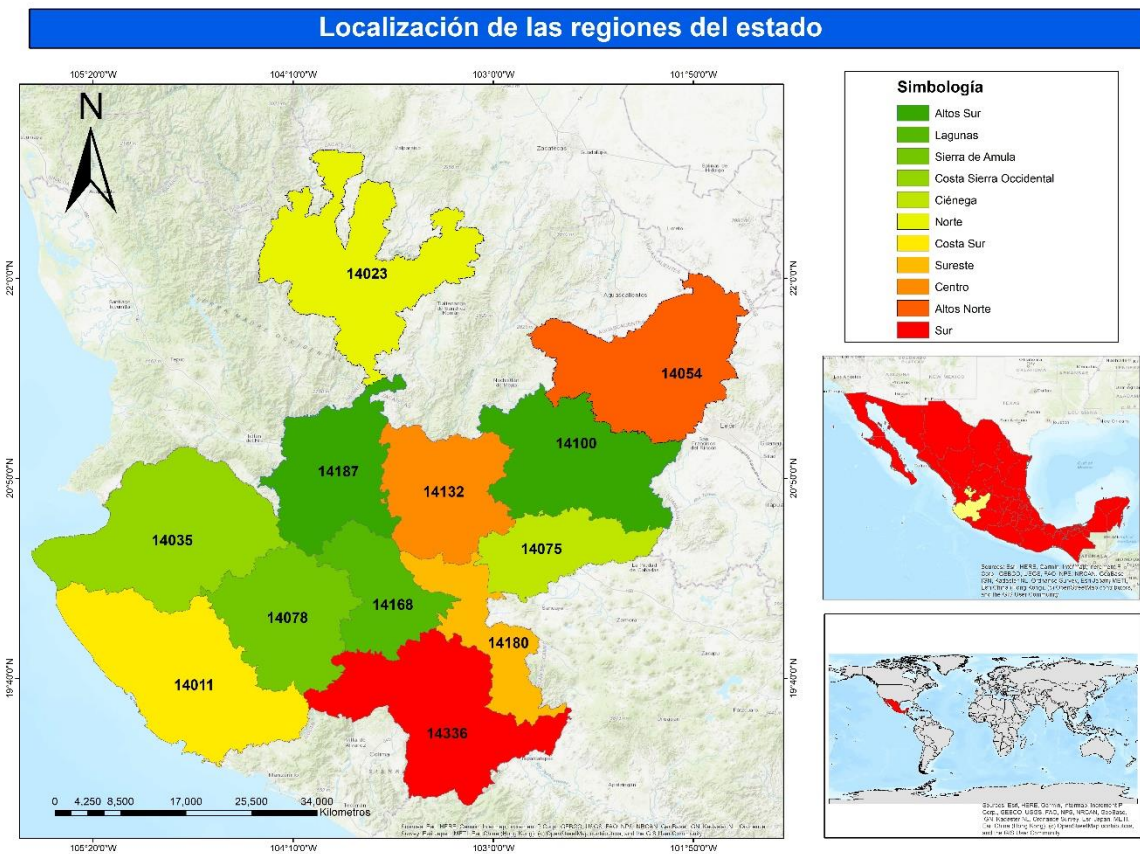


Figura 5: Localización de las regiones del estado de Jalisco y sus estaciones representativas.

2.4- Distribución anual de precipitaciones

Partiendo de que la distribución anual de las lluvias en Jalisco es unimodal, o sea, presenta una temporada lluviosa y otra seca, se procede a determinar los límites temporales de dichos períodos. Para ello se emplea el método propuesto por Liebmann et al. (2012) conocido como anomalías climatológicas acumuladas. Esta propuesta metodológica ha sido empleada en diferentes escenarios geográficos (Boyard-Micheau et al., 2013; Diaconescu et al., 2015 and Dunning et al.2016), mostrando resultados consistentes.

El método se basa en determinar los puntos de quiebre entre un período y otro a partir de series climatológicas. En esta investigación se emplean los datos péntadas de CHIRPS, con series de 38 años, debido a la correcta resolución espacial y temporal, demás, esta frecuencia de registros permite suavizar la muestra sin perder utilidad práctica (Marengo et al., 2001).

El procedimiento consiste en el cálculo de las anomalías climatológicas acumuladas $A(d)$ para cada serie de tiempo

$$A(d) = \sum_{n=1}^d (R(n) - \bar{R}) \quad (9)$$

donde d es la cantidad de días que se van a considerar (en este caso sería la cantidad de pñtadas que tiene un año), n es el contador de cada uno de los datos en la serie, $R(n)$ es el valor promedio de lluvia de cada día y $\bar{R}$ es el promedio climatológico anual de lluvia.

Se considera como inicio del temporal cuando el valor promedio diario supera la media histórica, siguiendo esa tendencia por varios días, y el final cuando sucede lo contrario. El procedimiento se ejemplifica en la Figura 6.a, donde la línea azul indica las anomalías diarias de lluvia con valores tanto negativos como positivos. En el caso de la Figura 6.b, la frecuencia acumulada muestra una oscilación donde el cambio de pendiente va a indicar el punto de quiebre. Cuando la pendiente pasa de negativa a positiva, el punto con pendiente cero es el quiebre y un día después del mismo se considera el inicio del período lluvioso. Asimismo, el punto donde la pendiente vuelve a cambiar su signo sería el final del temporal. Esta metodología se aplica para cada nodo de la malla de datos CHIRPS, y el resultado será la pñtada del año donde, como promedio, inicia el temporal y donde termina.

Hay que resaltar la variabilidad interanual que pueden presentar el inicio y el finnal del temporal. Por lo tanto, se determinan dichas fechas para cada año y luego se calcula la desviación estándar como medida de rango válido entre el cual se pueden presentar ambas fechas sin perder significancia estadística.

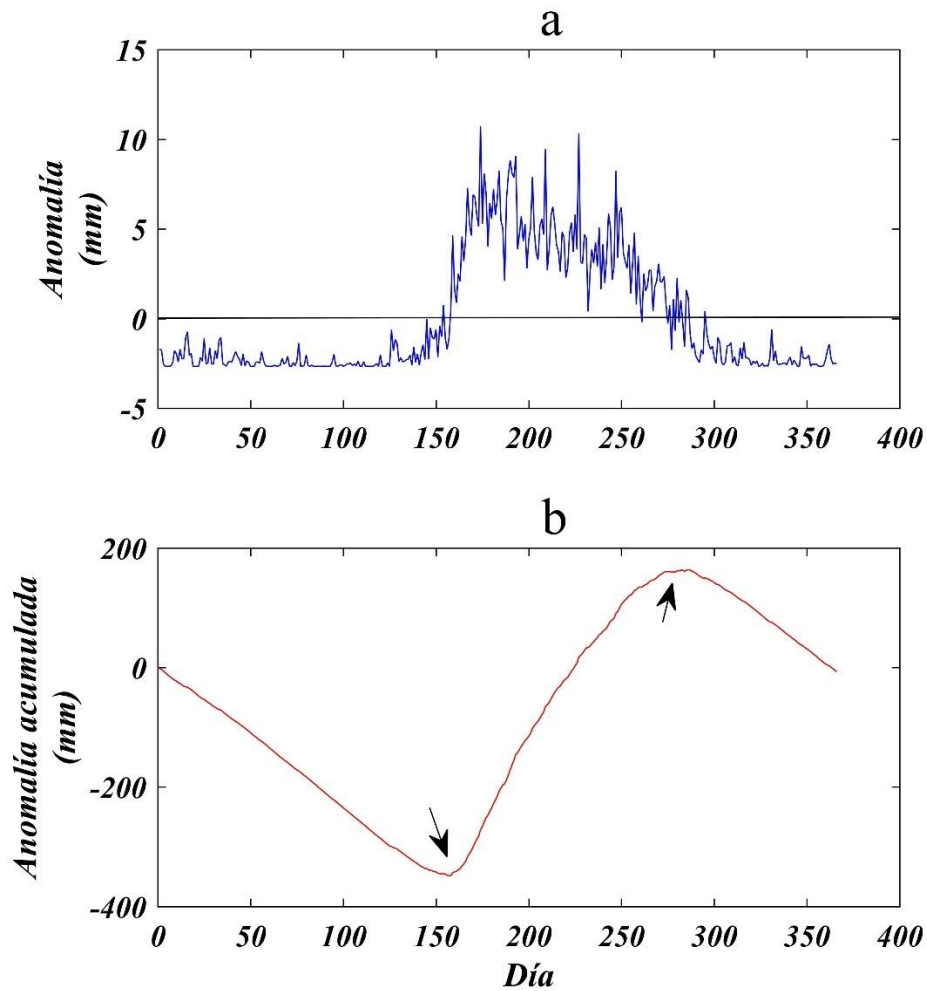


Figura 6: Anomalías diarias (a) y anomalías acumuladas (b) de precipitación para la estación “La Experiencia-14329” en el municipio Guadalajara.

2.4.1- Máximo mensual

Este análisis se apoya en los mismos datos ya descritos (péntadas de CHIRPS). El objetivo es determinar el mes en que se produce la péntada de máxima precipitación anual. En cada nodo de la malla CHIRPS se localizó la péntada máxima en cada año y se le asignó un valor que corresponde al mes (del uno al 12) en cuestión. De esta manera se establecieron series temporales para cada nodo con el valor numérico del mes donde se produjo la lluvia máxima. Con ello se determinó la malla promedio y se interpoló para analizar la variabilidad espacial, además de la desviación estándar en cada punto que no indica cuan preciso es dicho valor.

Para llevar a cabo dicha interpolación, al igual que en el análisis anterior, se parte de un archivo NetCDF (el procesamiento de datos se realizó en Matlab). Con la caja de herramientas del software ArcGIS, estos datos se rasterizan y se construye una malla con los puntos correspondientes a los centroides de los píxeles de dicho ráster; puntos que a su vez van a tomar el valor promedio de cada píxel. Por último, esta capa de valores se interpoló con la técnica Kriging Universal y se clasificó con el método estadístico “Natural Breaks (Jenks)”.

2.5- Exposición y Vulnerabilidad

El grado de exposición de la población se establecerá a partir de la relación del peligro con una serie de indicadores estructurales de la población. Según el marco teórico planteado, se introduce en este análisis el rango de acción de este peligro, sin embargo, teniendo en cuenta la característica de la variable precipitación, el peligro tiene una cobertura estatal, lo que cambia es el valor que presenta y por tanto su nivel de influencia.

En cuanto a la vulnerabilidad, se analiza la distribución de sus indicadores sin tener en cuenta la magnitud de dicho peligro (ver Marco Teórico), asumiendo que, ante un evento con un espectro espacial como este, todas las sociedades deben estar preparadas y alertas.

La unidad espacial de análisis tomada para este apartado es la delimitación político-administrativa municipal, en concordancia con la escala del área de estudio (el estado de Jalisco) y con la resolución de los datos empleados en el peligro. Esto permite una mejor integración futura de los resultados con la información oficial de organismos como CONAGUA y el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) (Romo, 2021).

De los productos de peligro que resultaron se seleccionaron dos. El primero es la lluvia máxima anual en 24 horas para un período de retorno de cinco años. No se toman otros valores de recurrencia debido a que lo significativo es la distribución espacial, la cual es la misma para todos los períodos que se quieran tomar. Se adopta este producto por ser el punto de partida de muchas de estas investigaciones (véase apartado de Estado del Arte).

El segundo indicador que se empleó es la tendencia de las precipitaciones máximas. Este elemento cobra relevancia en el marco del actual cambio climático, o si se quiere en su propia

variabilidad climática, donde las tendencias suelen acentuarse sobre todo en los umbrales de las variables.

En la Tabla 2 se muestran los elementos de exposición y vulnerabilidad que fueron analizados, tomados del Censo de Población y Viviendo de Jalisco de INEGI (2020). El porcentaje del total de población es el punto de partida, seguido por la densidad y la tasa de crecimiento poblacional. Estos tres elementos describen cuan expuesta está la población, sin que directamente y por sí solas sean características de dicha población que indiquen una mayor o menor vulnerabilidad. Se asume así que una ciudad con alta concentración y crecimiento poblacional no necesariamente tiene que ser más vulnerable.

Tabla 2: Indicadores para identificar la exposición y la vulnerabilidad ante precipitaciones máximas.

Exposición física	Vulnerabilidad
. Población (%)	. Población mayor de 65 y menor de 5 años
. Densidad de población (hab/km ²)	(%)
. Tasa de crecimiento	. Personas con alguna discapacidad (%)
	. Viviendas con piso de tierra (%)
	. Viviendas sin drenaje (%)
	. Viviendas sin TIC (%)

Nota: La Tasa de crecimiento es del período 2010-2020. Las viviendas se refieren a las viviendas particulares habitadas, TIC- Tecnologías de la información y de la comunicación.

En contraparte, las variables de vulnerabilidad sí indican parámetros estructurales de la población que le confieren un nivel de capacidad para enfrentar el peligro en cuestión. En primer lugar, se toman los grupos etarios mayores de 65 años y menores de 5 años. Los tipos de discapacidad tenidos en cuenta fueron: motora, visual, lingüística y auditiva. Se asume que a las personas con estas condiciones (tanto las incluidas en estos rangos etarios como con discapacidad) se les dificulta reaccionar ante situaciones complicadas como una inundación súbita. El porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra se utiliza como elemento representativo de menor nivel socioeconómico; a menor nivel socioeconómico, menor capacidad para enfrentar un riesgo asociado con lluvias fuertes. El indicador de las viviendas sin ningún tipo de drenaje se seleccionó atendiendo a la realidad física de la

variable que actúa como fuente de peligro; una casa sin drenaje es más propensa a sufrir inundaciones. Por último, las viviendas sin ningún tipo de tecnología de información y telecomunicación (TIC) se traducen en deficiencias para recibir alertas tempranas, indicaciones por parte de las autoridades, así como para emitir señales de auxilio.

El primer paso contempla un análisis cartográfico descriptivo, donde se visualiza la espacialidad de cada uno de los indicadores de manera individual. Luego, las variables al no ser homogéneas en cuanto a unidad de medida se normalizan de cero a uno a partir de la ecuación XX. De esta manera se pudo trabajar con series homogeneizadas y operar entre ellas.

$$Y = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (xx)$$

Donde Y es la nueva variable normalizada, x el valor real, x_{min} y x_{max} el mínimo y el máximo de toda la serie respectivamente.

La exposición se analizó desde dos métodos. El primero, propuesto por Dixon y Moore (2011), clasifica las unidades de análisis en configuraciones. A la combinación de las componentes de exposición y al peligro se les asignaron valores de altos y bajos, empleando como umbral la mediana. Así, se lograron definir cuatro configuraciones: alta exposición y alta incidencia de peligro, alta exposición y baja incidencia, baja exposición y alta incidencia, baja exposición y baja incidencia (Figura 7).

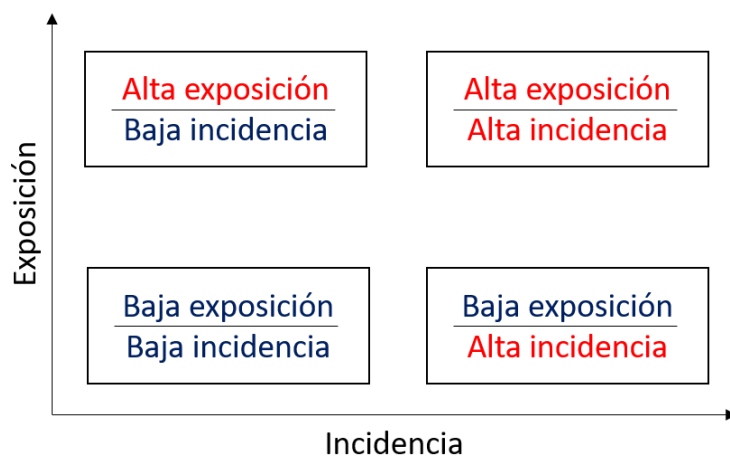


Figura 7: Esquema de las configuraciones que combinan los niveles de exposición e incidencia

El segundo método es similar al seguido por Romo (2020), donde las variables luego de ser normalizadas se integraron de forma sumatoria y se dividieron en cinco clases: muy baja, baja, media, alta y muy alta. A diferencia del método anterior, este procedimiento permite una categorización de la exposición.

La vulnerabilidad también se trabaja bajo el mismo método de Romo (2020). Se aclara que no se les añaden pesos a las variables ya que se considera que todas tienen la misma influencia en el producto combinado.

El producto final de la presente investigación es cuantificar el nivel de riesgo asociado a las precipitaciones máximas. De acuerdo con el marco teórico, dicho valor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Riesgo = Peligro + Exposición + Vulnerabilidad$$

Las variables de esta relación se categorizan del uno al cinco, luego se suman y la serie numérica final se clasifica en cuantiles para los niveles de riesgo finales, desde muy bajo hasta muy alto. Este proceso se realiza para los dos indicadores de peligro.

3- Análisis Espacio-Temporal

3.1- Evaluación de las bases de datos.

En este apartado se realiza una evaluación de dos bases de datos como fuentes para el posterior análisis espacio-temporal de las lluvias máximas en Jalisco: las estaciones climatológicas convencionales de CONAGUA y los productos del CHIRPS.

3.1.1- Estaciones CONAGUA

En el estado de Jalisco se encuentran ubicadas un total de 123 estaciones climatológicas convencionales en activo, administradas por CONAGUA. Entre las variables que se registran se encuentra la precipitación acumulada en un lapso de 24 horas.

Las diferencias en las fechas de inicio de registros, así como la irregularidad en la toma de estos, derivan en la necesidad de homogeneizar la base de datos. Para este fin, como se señaló en la metodología, se parten de dos premisas: tener series lo suficientemente largas como para cumplir con el criterio de estudio climático, y adoptar solo las estaciones con un sesgo inferior al 25% del total de los datos en dicho lapso. Se busca un período de estudio óptimo, con la mayor cantidad de registros posibles y mínima afectación a la resolución espacial.

El primer período de estudio considerado es de 1961 a 2018; se asume como fecha de partida el registro más antiguo y como final a la fecha más reciente al inicio de la investigación. Sin embargo, al realizar un análisis de datos faltantes, como indica la Tabla 3, solo 58 estaciones tienen más del 75% del muestreo en esos años, lo que representa el 47.2% del total, perdiendo así mucha resolución espacial. De ahí que se modifica ese lapso de tiempo y se toma como punto de partida el año 1981; fecha de inicio recurrente en la base de datos. En este caso, 92 estaciones (74.8%) cumplen con el criterio para ser consideradas en la investigación. De esta manera se cumple con la norma para estudios climatológicos y a la par se tiene una cobertura espacial aceptable (dentro de la resolución inicial).

Por lo que se trabajó con una base de datos compuesta por registros diarios de precipitación de 92 estaciones climatológicas a lo largo del estado de Jalisco, en un período de 1981 a 2018.

Tabla 3: Período de estudio

Período	Estaciones disponibles	Datos registrados (%)
1961-2018	58	47.2
1981-2018	92	74.8

3.1.2- Datos CHIRPS

En el territorio mexicano, CHIRPS muestra un comportamiento aceptable y es recomendado su uso como una base de datos auxiliar en los estudios relacionados con sequías y condiciones promedio (Perdigón et al., 2017, Morales et al., 2021). Sin embargo, no se documentan investigaciones que caractericen los productos del CHIRPS para los valores máximos de precipitación en una escala regional como es el caso de Jalisco.

En esta sección se presentan los resultados del análisis de los estadígrafos propuestos, en aras de obtener conclusiones sobre la factibilidad del uso de la base de datos CHIRPS en la construcción de los índices de precipitación máxima anteriormente señalados (ver apartado de Metodología).

3.1.2.1- Estadígrafos

La Figura 8 muestra una gráfica de cajas que describe el sesgo producido por el CHIRPS en cada estación y en cada uno de los índices en estudio. Para MR1 y MR5 se observa una subestimación del orden de los -20 mm, con valores medios similares, aunque una mayor amplitud en los extremos por parte del MR5. Ambos indicadores exhiben seis estaciones consideradas como outlayers, y un percentil 75 que se aproxima al valor ideal cero.

Por su parte, el CWD y el DOP95 sobrestiman en una media de un día, con una ligera mayor amplitud y más outlayers para el DOP95. Es necesario destacar que, en ambos casos, un 25% de las estaciones toman valores negativos correspondiente con una subestimación.

Por último, en el 75% de las estaciones, el índice SDII del CHIRPS subestima los valores de su contraparte, con la mitad de los registros entre 0 y -2. Solo dos estaciones son consideradas outlayers y la amplitud total se extiende hasta los 9 mm/día, con la mediana ubicada entre 0 y -1.

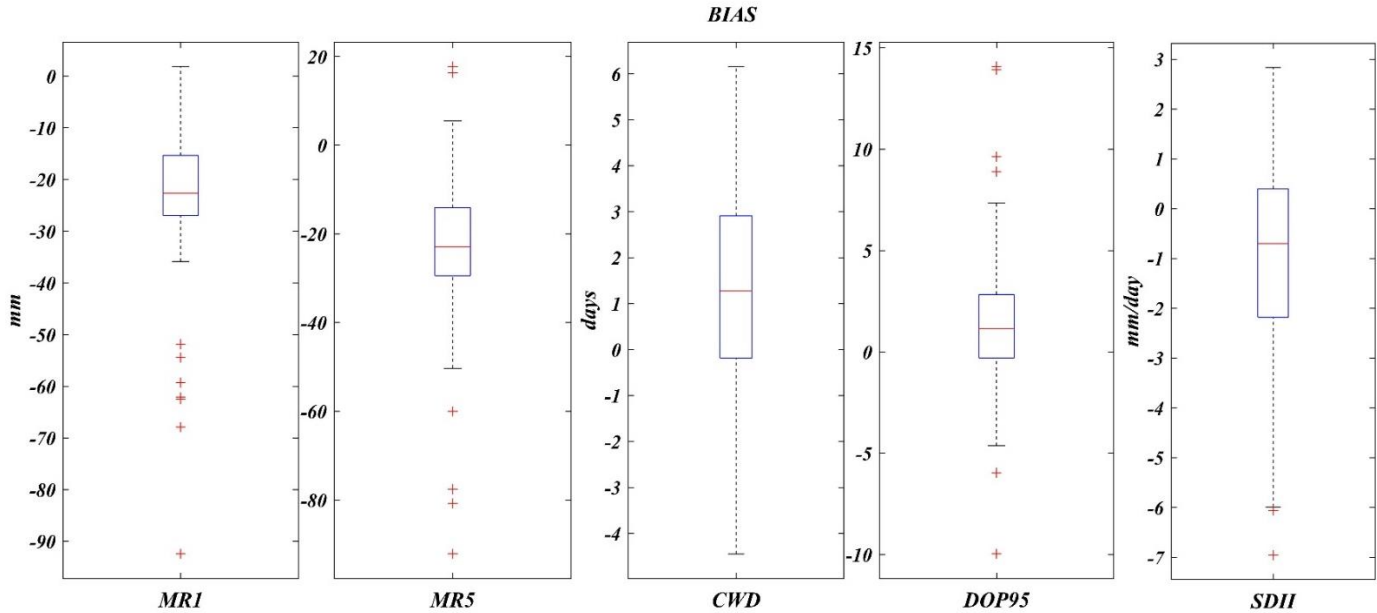


Figura 8: Comportamiento del BIAS para cada indicador. En cada caja, la línea roja es la mediana, los límites son los percentiles 25 y 75 y los bigotes se extienden hasta los valores extremos. Las cruces rojas representan outliers.

El RBIAS es la representación porcentual de los valores del BIAS para cada serie de tiempo original (Figura 9). El índice MR1 muestra una subestimación del CHIRPS entre el 10 y hasta un 60% de los valores originales de precipitación, con una media cargada al 50%. Solo una estación toma un valor positivo y cercano a 0, sin embargo, la técnica estadística lo considera outlier.

En el caso de CWD y DOP95, la mitad de los valores van desde 0 a 50% aproximadamente, con el último cuartil que se extiende hasta el 80 y 90% respectivamente. Destaca además el extremo inferior del DOP95 que sobrepasa una subestimación de más del 50%. En ambos casos el segundo cuartil toma valores entre 0 y 25%.

Para el MR5 y el SDII, el RBIAS indica porcentos cercanos a 0, con las medianas más cercanas al valor ideal, inferiores al 10%. El MR5 presenta la menor amplitud entre todos los índices, tanto en el total de la muestra como en los valores centrales, mientras que el SDII no exhibe outliers y ninguno de sus extremos sobrepasan el 50%.

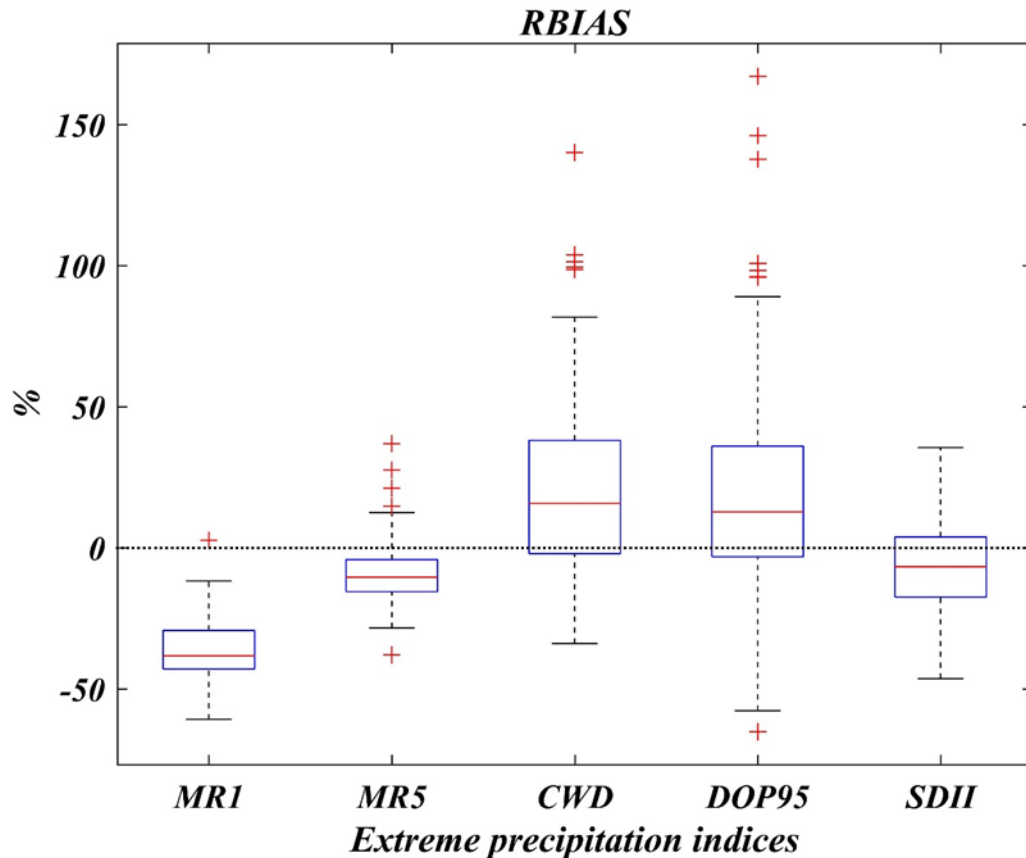


Figura 9: Gráfico comparativo del RBIAS entre los cinco índices. La línea punteada indica el valor ideal.

Los resultados del RMSE se muestran a partir de histogramas en la figura 10. En todos los casos, existe una alta concentración de estaciones en torno a los valores más bajos, con una disminución a medida que aumenta el error, aceptando un ajuste de curva tipo ganma y lognormal.

Tanto para el MR1 como para MR5, el pico se encuentra alrededor de los 20 mm, con valores que llegan hasta el rango 60-65 mm. Sin embargo, los RMSE del MR5 presentan más dispersión debajo de la curvatura mayor, con registros incluso entre 0 y 10 mm. Para el caso de los índices expresados en días, la pendiente de la curva de ajuste es nula alrededor de los dos días. Se evidencia una distribución debajo de la máxima curvatura más homogénea para el CWD, y los valores se concentran principalmente hasta 4 días; mientras que, para el DOP95, la cantidad de estaciones alrededor del pico de dos días es mayor, entre 30 y 35. Finalmente, el SDII muestra un comportamiento similar al RM1, con el mayor número de casos alrededor de los 2mm/día, y pocas estaciones dispersas entre 4 y 8 mm/día.

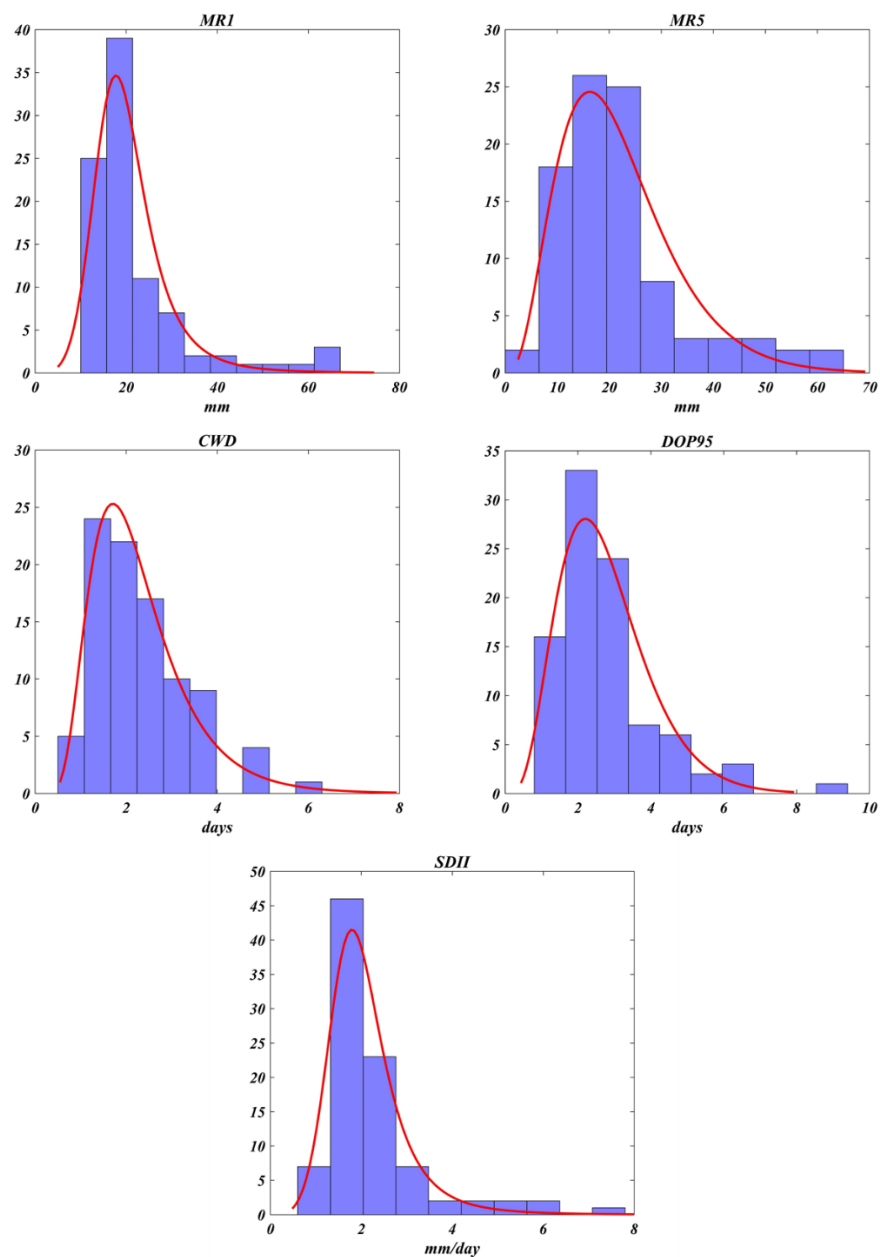


Figura 10: Histograma y ajuste de curva del valor de RMSE (x) contra el número de estaciones (y).

El análisis del coeficiente de correlación R^2 se inicia con la construcción de una serie temporal para cada uno de los índices. Estas series comprenden la unión de las 92 estaciones en estudio. Así, se obtiene un valor de correlación representativo de todo Jalisco para cada indicador (Figura 11).

En los cinco índices el ajuste lineal presenta valores positivos de R^2 , indicando una correlación directamente proporcional. El valor más alto corre a cargo del MR5, con un índice de 0.39, seguido por el 0.3 del SDII. Por el contrario, en el CWD la alta dispersión

hace presumir la no existencia de un forzamiento claro de los datos CHIRPS sobre los correspondientes a CONAGUA, con un ajuste de apenas 0.09. El resto, MR1 y DOP95, tienen correlaciones de 0.21 y 0.27 respectivamente.

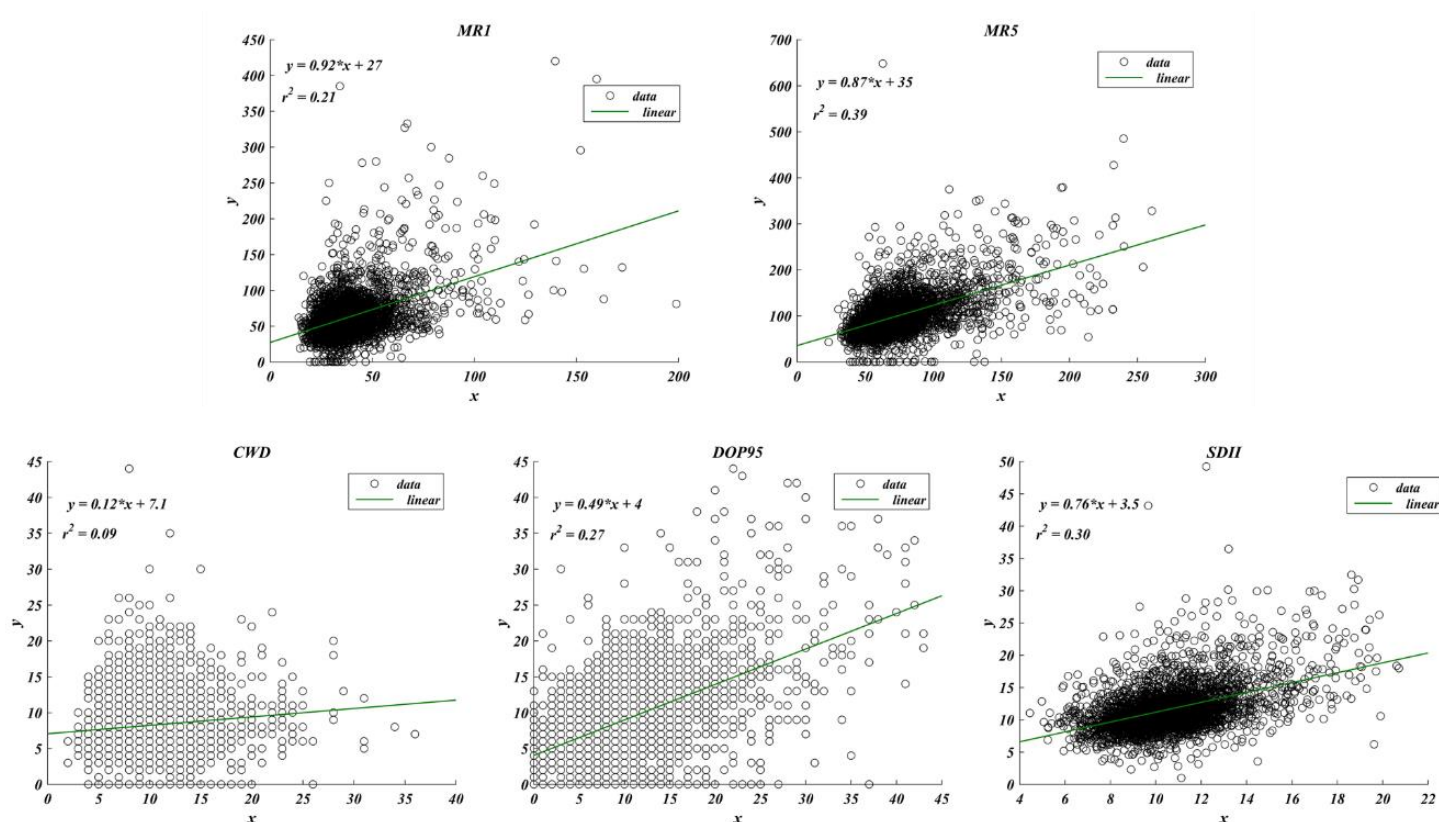


Figura 11: Gráfico de dispersión con ajuste lineal para cada uno de los índices. En la ecuación de ajuste, y-estaciones in situ, x-CHIRPS.

Luego de conocer la correlación general, y en aras de obtener resultados más representativos para cada caso de estudio, se realiza un análisis similar a los estadígrafos anteriores. En la Figura 12 se observa como la mayoría de las estaciones del RM1 presentan correlaciones inferiores a 0.2, contrastando con el resultado previo, y apenas una estación se encuentra en el rango 0.4 - 0.6. Por su parte, distribuciones similares se aprecian en CWD y DOP95, donde la primera clase (en azul) se mantiene como dominante, seguida por aproximadamente 10 estaciones en la segunda clase, 0.2 – 0.4. En ambos casos, a diferencia del primer índice comentado, aparece la clase 3 en rojo (0.6 – 0.8), aunque en menos de cinco estaciones. Siguiendo la línea de valores crecientes, se encuentra el índice SDII, con una distribución más homogénea entre las tres primeras clases, y donde la mitad de los casos de estudio se posicionan entre 0.2 y 0.6. Por último, el índice con mejores valores de correlación es el

MR5, con menos de 10 casos por debajo 0.2 e igual cantidad por encima de 0.6. Además, más de la mitad del total exhibe una correlación directamente proporcional entre 0.4 y 0.6.

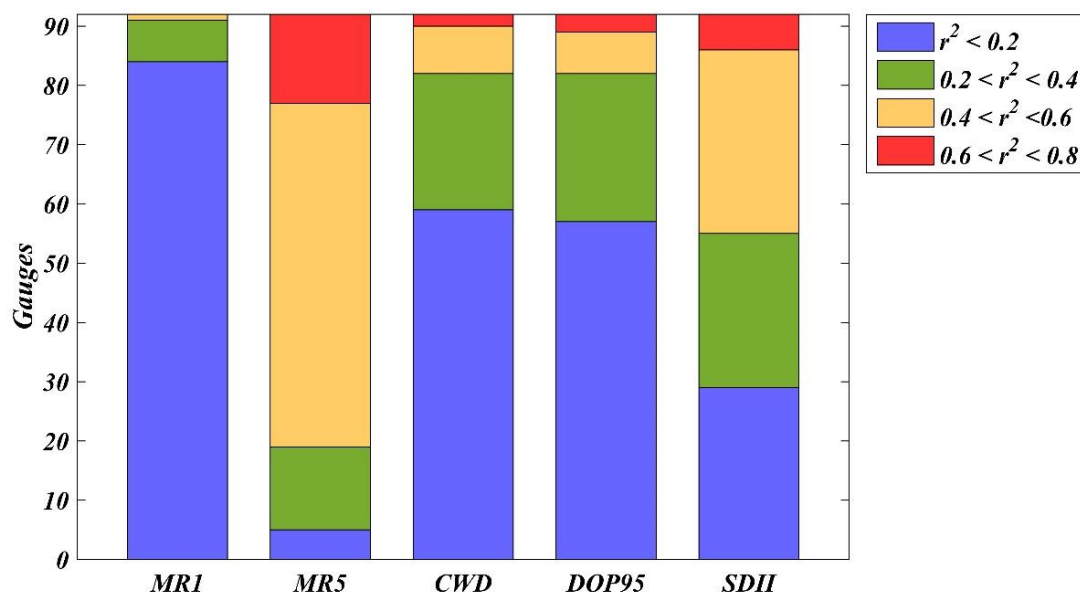


Figura 12: Gráfico de barras apiladas que muestran el comparativo entre los resultados de R² de cada una de las estaciones y por cada índice de precipitación extrema. Las clases solo llegan al 0.8 debido a que el máximo absoluto fue de 0.69.

3.1.2.2- Distribución espacial

A continuación, se analiza la distribución espacial de la variabilidad del R² para el índice que mostró los valores más elevados, el MR5. La Figura 13 muestra una interpolación IDW y división en siete clases cada 0.1. Se aprecia un patrón con valores más elevados hacia el interior del estado y valores más bajos hacia la costa.

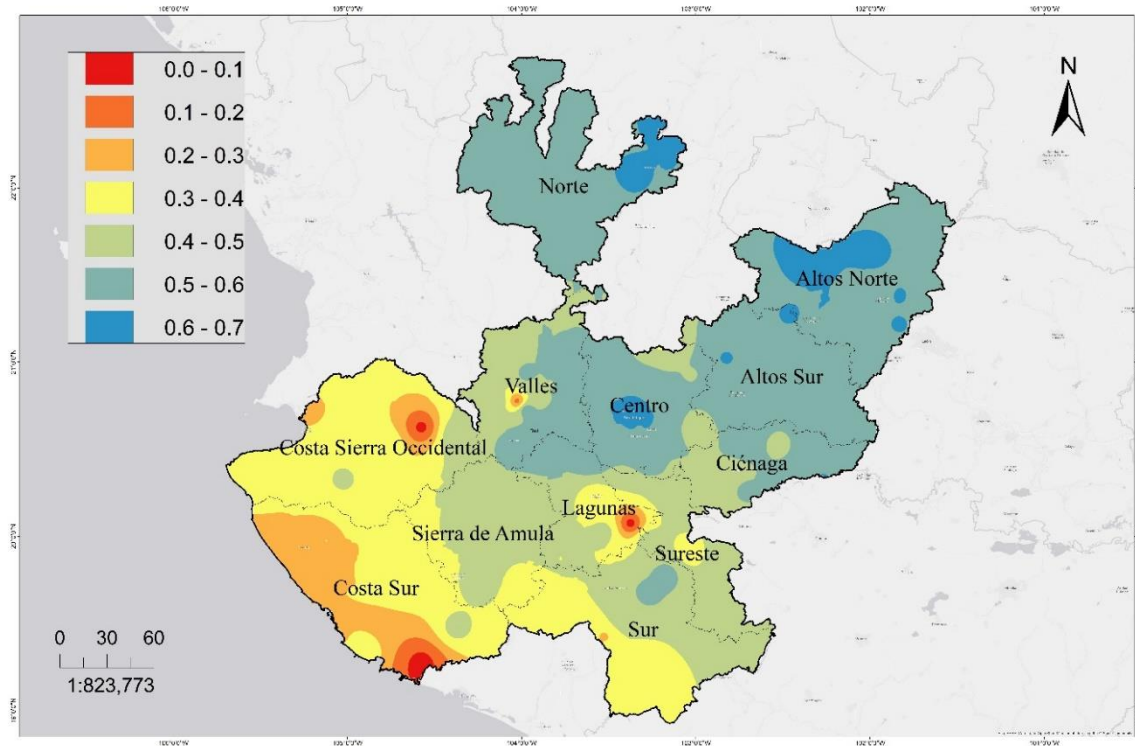


Figura 13: Mapa de distribución espacial del coeficiente de determinación para el MR1.

Esta tendencia visualizada espacialmente se comprueba a partir de un análisis de regresión lineal múltiple (tabla 4). Se evalúa el impacto de la posición geográfica (latitud y longitud) y de la altitud en la variabilidad espacial de la correlación entre el CHIRPS y las estaciones *in situ*. En el primer caso, se incluyen los tres posibles moduladores en la regresión, resultando un R^2 de 0.4, lo cual indica cierto forzamiento sobre la variable independiente. Sin embargo, el p-valor asociado a la altitud supera el nivel de confianza del 95% (p-valor > 0.05), por lo que este parámetro no contribuye a la variabilidad. De esta manera, el segundo ajuste excluye la altitud y se queda solo con la latitud y la longitud, manteniendo el valor de $R^2=0.4$.

Tabla 4: Regresión lineal múltiple

X	n	pValue1	m	pValue2	p	pValue3	q	pValue4	RMSE	r^2
I	5.23	1.9E-02	0.06	5.4E-03	0.07	2.4E-04	0.01	0.72	0.11	0.40
II	0.40	9.0E-04	0.06	3.7E-05	0.07	3.3E-05	-	-	0.11	0.40

Nota. $y(x) \sim n + m \cdot \text{lon} + p \cdot \text{lat} + q \cdot a$
I – $x=[a, \text{lon}, \text{lat}]$; II – $x=[\text{lon}, \text{lat}]$
a – altitud, lon – longitud, lat – latitud

3.1.2.3- Categorización de los índices

Derivado de los resultados expuestos anteriormente, se procede a realizar una categorización del uso de los índices de precipitación intensa a partir de CHIRPS en el estado de Jalisco, y de esta manera, archivar conclusiones y proponer recomendaciones en el uso de dicha base de datos.

El índice RM1, quizás el más empleado para definir estrategias de gestión de riesgo, exhibe resultados poco favorables. Los valores derivados del CHIRPS subestiman la serie de tiempo original, con sesgos que llegan incluso al 50% del valor real, con un error sistemático que se extiende hasta los 40 mm. Este comportamiento conduce a cálculos erróneos de productos importantes para los mapas de peligro como son los períodos de retorno. Por lo que, estudiar el MR1 a partir de los datos CHIRPS resulta inefectivo e incluso peligroso teniendo en cuenta el uso de este índice para la planificación de construcciones civiles como presas y puentes, así como en la definición de zonas federales alrededor de cuerpos de agua, entre otros. Además, no existe correlación entre CHIRPS y las estaciones *in situ*, eliminando así su aplicabilidad para complementar series temporales y para realizar estudios de tendencia.

En cuanto a los índices CWD y DOP95, los resultados mejoran los del MR1 en los cuatro estadígrafos empleados, sin embargo, no son consistentes. Aunque en la cuarta parte de las estaciones el sesgo es limitado, en el resto se presenta una sobreestimación, llegando incluso a duplicar los valores reales. Además, se presentan con un error sistemático elevado y una relación directamente proporcional con baja significancia estadística.

Teniendo en cuenta la alta ineficacia por parte del CHIRPS en los valores máximos anuales, es de esperar que el percentil 95 tampoco sea reflejado correctamente, y por consiguiente todos los productos relacionados con esta medida de posición. Por este motivo, no se aconseja usar esta base de datos para definir umbrales móviles de lluvia intensa como los presentados por Gutiérrez et al. (2011). Además, los errores en la cantidad máxima de días consecutivos con lluvia, con baja correlación y alta subestimación, son una posible consecuencia del algoritmo con el cual se construye la base de datos CHIRPS (Funk et al., 2015), donde se realiza una corrección *a posteriori* de los acumulados en péntadas, décadas y mensuales.

Los resultados para el índice SDII presentan una mejora significativa a sus predecesores. El sesgo se ve restringido en torno al cero, con extremos que no sobrepasan el 40% del dato real. Se considera que la correlación es aceptable, con la mayoría de los valores por encima del 0.2, sobrepasando incluso en algunos el valor de 0.6. Por lo que, el CHIRPS revela adecuadamente la dispersión temporal de la precipitación total a lo largo del año y puede tomarse como referencia para analizar cuán concentrada o no estuvo dicha variable atmosférica, muy útil sobre todo para los procesos de remoción en masa y las planificaciones agrícolas.

Por último, el índice MR5 es el mejor descrito por CHIRPS. Los productos se desvían muy poco, concentrándose en una ligera subestimación, con errores incluso inferiores al MR1, a pesar de su mayor escala temporal. Lo más destacado es la correlación con las estaciones *in situ*, con casi todos los R^2 por encima de 0.4 y un máximo de 0.69. Estos valores no estuvieron en el orden de 0.8 o superior, aunque se deben tomar en cuenta los errores intrínsecos en los datos que se consideran como referencia, tanto en las mediciones como en la sistematización de la información. Con base en estos resultados, más la distribución espacial, sí se recomienda el uso de la base de datos CHIRPS en la evaluación de las precipitaciones máximas acumuladas en cinco días, sobre todo en la porción centro y noreste del estado. Sin embargo, los productos no son consistentes en la región sudeste, principalmente en las regiones costeras. Se estima que este patrón espacial está asociado con el paso de sistemas como ondas tropicales y ciclones tropicales por las costas de Jalisco, interfiriendo en la certeza de las péntadas y por tanto del MR5.

Se puede concluir que esta base de datos no visualiza correctamente los extremos anuales diarios, por lo que se descarta su uso en cálculos de recurrencia y otros análisis que involucren dicho indicador. Tampoco es confiable en la determinación de los días consecutivos con lluvia y en la cantidad de días con acumulados por encima del percentil 95.

La distribución temporal de la precipitación anual y sobre todo de los máximos anuales en cinco días mostraron valores consistentes y correlacionados con los datos de referencia por lo que es factible el uso del CHIRPS para estos dos índices de precipitación extrema, principalmente en la región centro y noreste del estado, no así en zonas cercanas a la costa.

3.2- Tendencia de la precipitación

Uno de los productos derivados de los antecedentes climáticos es el conocimiento acerca de posibles tendencias en el tiempo de determinada variable. Tal es el caso de la precipitación, la cual puede o no mostrar cierta directriz hacia el aumento o disminución, incluyendo patrones espaciales de estos comportamientos.

Aun cuando la naturaleza, con su entramado de leyes aplicables a un espacio geográfico determinado, tiende a balancear inclinaciones anómalas y “burlar” la entropía global que marca la propia flecha del tiempo, estas tendencias en la precipitación brindan un posible panorama de escenarios futuros, una herramienta que bien pudiera representar un llamado de atención para los que forman parte de dicho medio ambiente.

Para conocer esta tendencia de precipitaciones máximas en cada una de las estaciones del estado de Jalisco se parte de una serie temporal compuesta por los totales anuales de lluvia. Este resultado indica si un área determinada ha sido más o menos lluviosa; sin embargo, puede solapar variaciones en los extremos, por lo que se toman en cuenta otros dos parámetros: los registros máximos anuales en 24 horas y el total de casos anuales con lluvia en 24 horas por encima del percentil 95. Cabe señalar que el valor de este percentil es específico para cada estación; por lo que la lámina de lluvia diaria será evaluada dependiendo de las características locales y no a partir de un umbral fijo para todo el estado, respetando así la variabilidad espacial de un parámetro con características puntuales. Ambas series fueron empleadas para los posteriores análisis de recurrencia y espectros de frecuencias respectivamente.

La prueba de Mann-Kendall revela la tendencia en el estado de Jalisco, proporcionando un resultado indicativo de crecimiento o decrecimiento, así como sus niveles de significancia estadística. Esta prueba se aplicó a las tres series temporales en cuestión: total anual, máximo anual en 24 horas y casos anuales superiores al percentil 95.

La Figura 14 muestra la tendencia de cada estación para las tres series temporales. Los ejes x son los indicadores de las estaciones y el eje y representa el valor de Z. Las líneas discontinuas indican el umbral a partir del cual la tendencia tiene una significancia estadística (0.05).

Visualmente se aprecia un comportamiento similar para las tres series temporales, con una tendencia al incremento para la mayoría de las estaciones, mientras que solo unas pocas estaciones exhiben un decrecimiento de las lluvias.

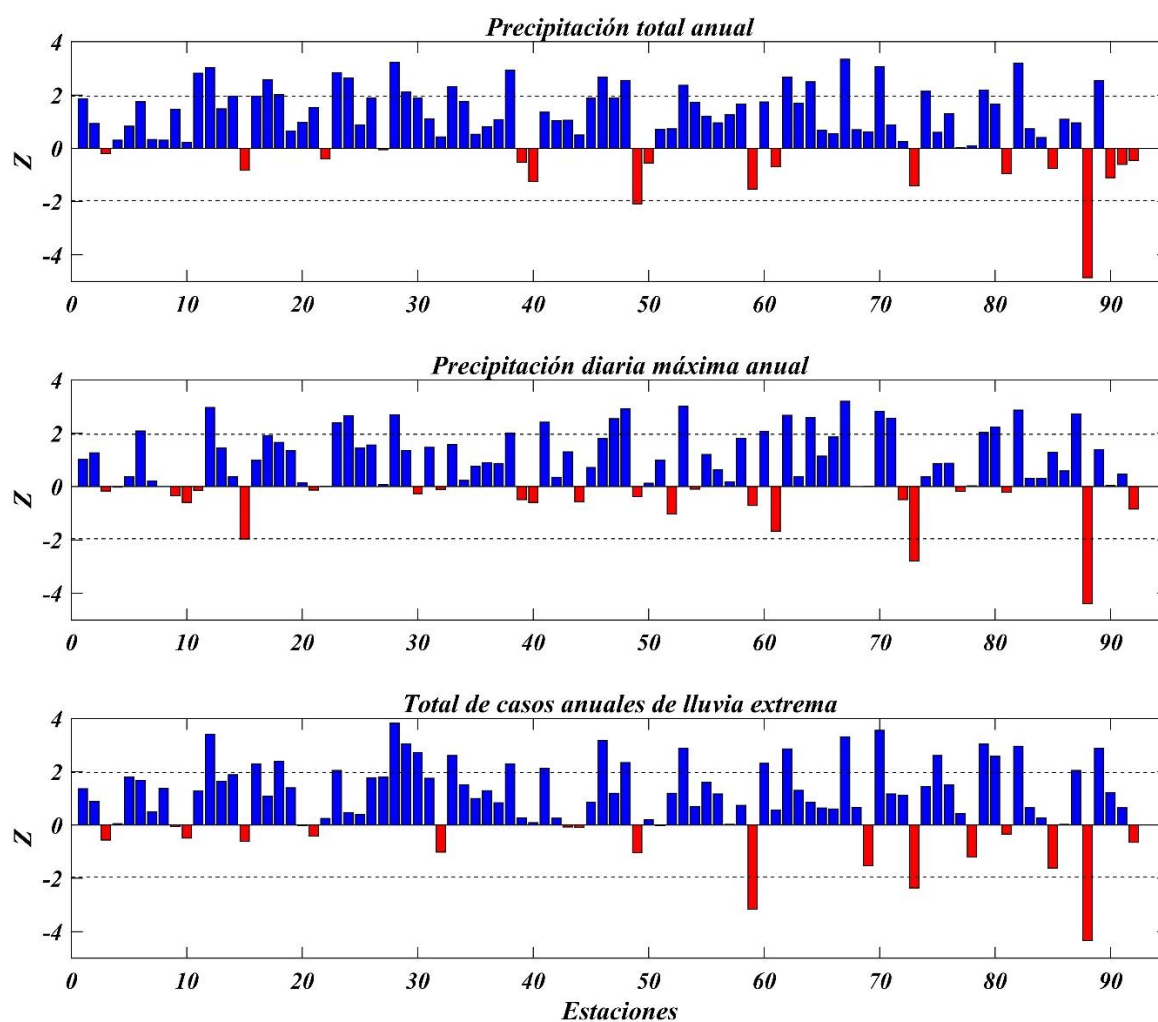


Figura 14: Tendencia de los índices “Precipitación total”, “Precipitación diaria máxima anual” y “Total de casos anuales de lluvia extrema” en cada una de las 92 estaciones.

La tabla 4. indica que, para el caso de la precipitación total anual, el 81% de las estaciones exhibieron un aumento en sus valores, con una significancia estadística en el 25% de los casos; mientras que solo el 2.2% presentó un decrecimiento significativo. Por su parte, la serie temporal de los máximos en 24 horas tuvo un incremento en el 75 % de los casos, en el 21.7% este incremento es significativo, mientras que apenas el 3.3% de las estaciones han

presentado una tendencia significativa a disminuir. Similares porcentajes resultan en el análisis de la tercera serie, con valores de 79.3%, 25% y 3.3% respectivamente.

Tabla 5: Distribución porcentual de la tendencia de precipitaciones en Jalisco

Variables	Creciente	Decreciente	Creciente sig.	Decreciente sig.
Total anual	81.5	18.5	25.0	2.2
Máximo anual	75.0	25.0	21.7	3.3
Total de casos	79.3	20.7	25.0	3.3

Nota. Total de casos se refiere al total de casos anuales de lluvia por encima del percentil 95.

Las regiones Centro y Valles, además de porciones del Sureste, Sur, Costa Sur, Costa Sierra Occidental, Altos Sur y Altos norte muestran una tendencia creciente significativa (Figura 15), mientras que solo el extremo superior del Norte y parte del Sur presentan una tendencia decreciente. Algunos puntos aislados, como es el caso del municipio de Tapalpa en la región centro, igualmente presentan una tendencia a la disminución, sin embargo, estos resultados deben corroborarse antes de ser tomados en cuenta.

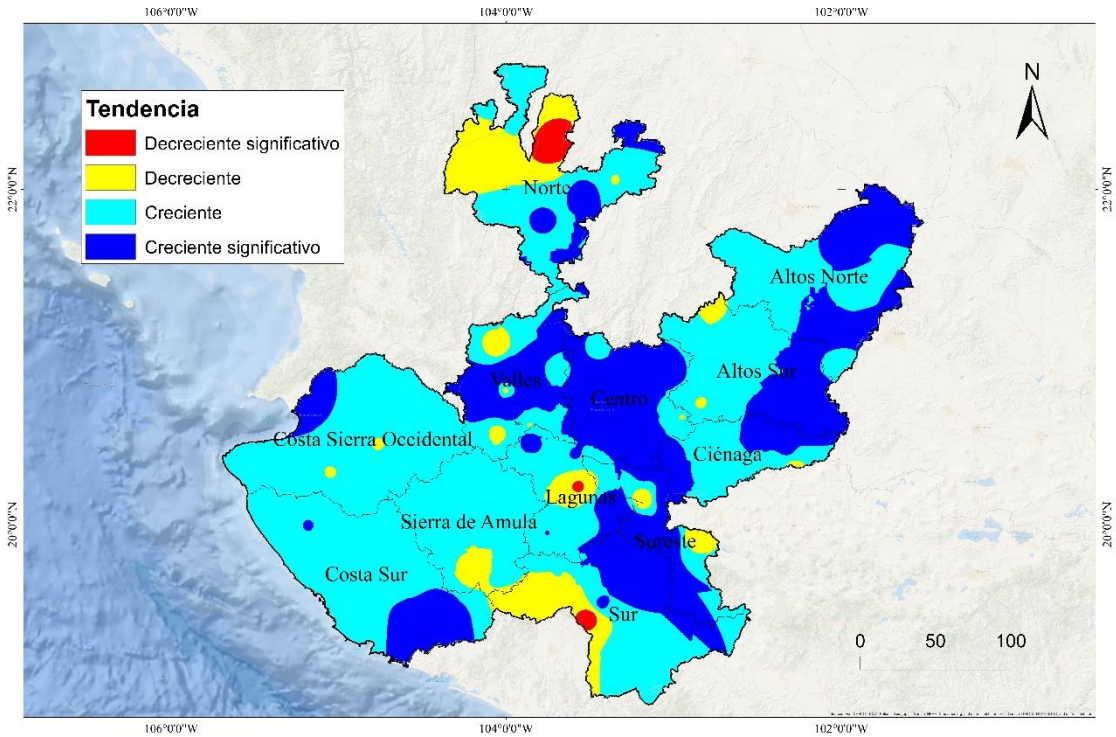


Figura 15: Distribución espacial de la tendencia de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas.

3.2.1- Prueba de bondad de ajuste

Antes de aplicar cualquier distribución o función teórica a partir de una serie de datos, se requiere hacer una prueba de bondad de ajuste. Como ya se planteó, para comprobar cuan válida es la distribución de Gumbel como ajuste para los datos de lluvia extrema, se calculó el coeficiente de determinación R^2 para cada estación climática.

La figura 16 revela que el ajuste toma valores superiores a 0.95 en el 84% de las estaciones, seguido por un 15% en el rango de 0.9 a 0.95. Por lo que las frecuencias teóricas explican en un alto grado la varianza total de las frecuencias reales. Así, se comprueba que el ajuste a la distribución de Gumbel es adecuado para el manejo de lluvias máximas en el estado de Jalisco. Solo una estación (14324) tomó valor inferior a 0.9 ($R^2=0.73$), representando apenas el 1% de la muestra total, por lo que no se considera un indicativo fuerte en los resultados de la prueba de bondad.

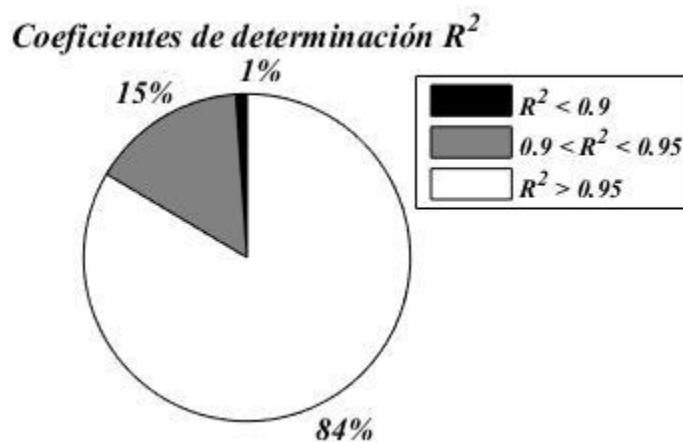


Figura 16: Gráfico con los porcentajes de estaciones con un R^2 en los rangos de la leyenda.

3.2.2- Períodos de retorno

A continuación, se analizan los resultados correspondientes al cálculo de los períodos de retorno de cinco años para cada estación de la zona de estudio (la tabla con todos los valores, incluyendo el resto de los períodos, se puede consultar en el apartado de *Anexos*).

El análisis exploratorio de los datos revela, en primera instancia, el histograma asociado a los acumulados de precipitación (Figura 17). Estos oscilan entre 42 mm (estación 14168) y 221 mm (14028), con una media de 80 mm y una desviación estándar de 31 mm. La mayor

parte de los valores son inferiores a los 96 mm, teniendo el tercer cuartil en 80 mm y describiendo una distribución normal hasta ese punto.

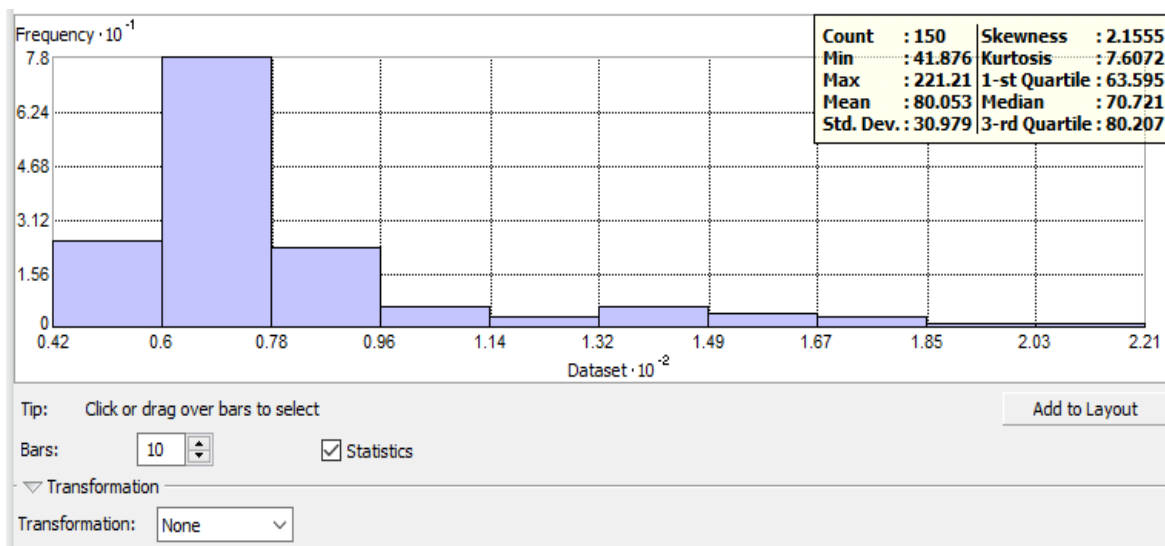


Figura 17: Histograma de acumulados de precipitación para un Pr5.

A continuación, se obtienen los mapas Voronoi de tipo simple (Figura 18.a) y de desviación estándar (Figura 18.b) de la distribución espacial de los períodos de retorno. Se construyen a partir de polígonos formados alrededor de los puntos de muestreo. Son un producto de interpolación basado en la distancia entre dos puntos que permite localizar el vecino más cercano y, por lo tanto, posibilita reconocer la existencia de patrones, en este caso, de la distribución de los acumulados de precipitación. Las figuras indican valores más elevados y con una mayor desviación estándar en la porción suroeste.

Esta tendencia a un patrón espacial en los datos se comprueba mediante otras dos pruebas.

La figura 19 corresponde a un análisis de tendencia espacial. Se observa como los valores de precipitación (curva azul) disminuyen con la latitud (eje y), mientras que aumentan (curva roja) en la dirección oeste (eje x, la longitud es negativa).

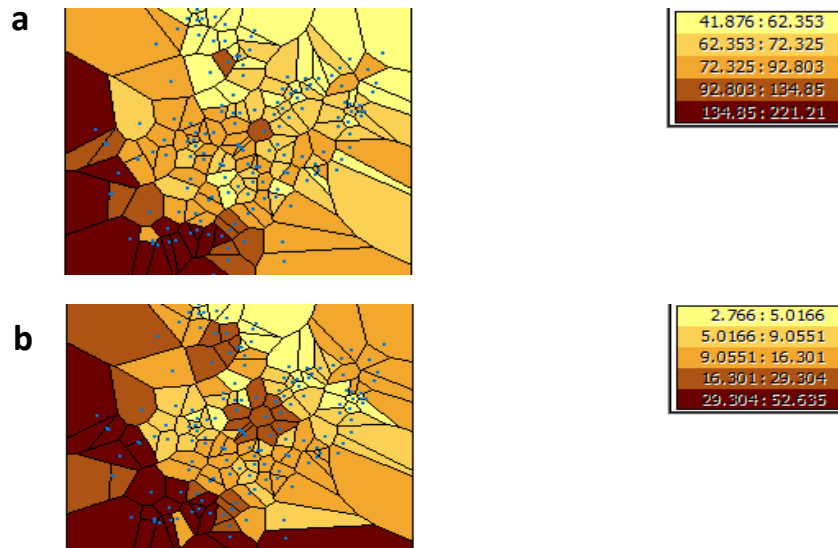


Figura 18: Mapa Voronoi a. simple, b. desviación estándar.

La segunda prueba es el semivariograma (Figura 20), que permite ver la autocorrelación espacial, es decir, determina si las concentraciones de valores de precipitación tienen una distribución aleatoria o si existe una asociación significativa de valores similares o diferentes entre zonas vecinas. El eje x representa la distancia entre puntos en el plano, mientras que el eje y indica el valor del semivariograma. Si la distribución no es aleatoria, a medida que aumenta la distancia entre los puntos también debe aumentar el valor del semivariograma. En este caso se observa una tendencia que muestra la existencia de un patrón en la distribución espacial.

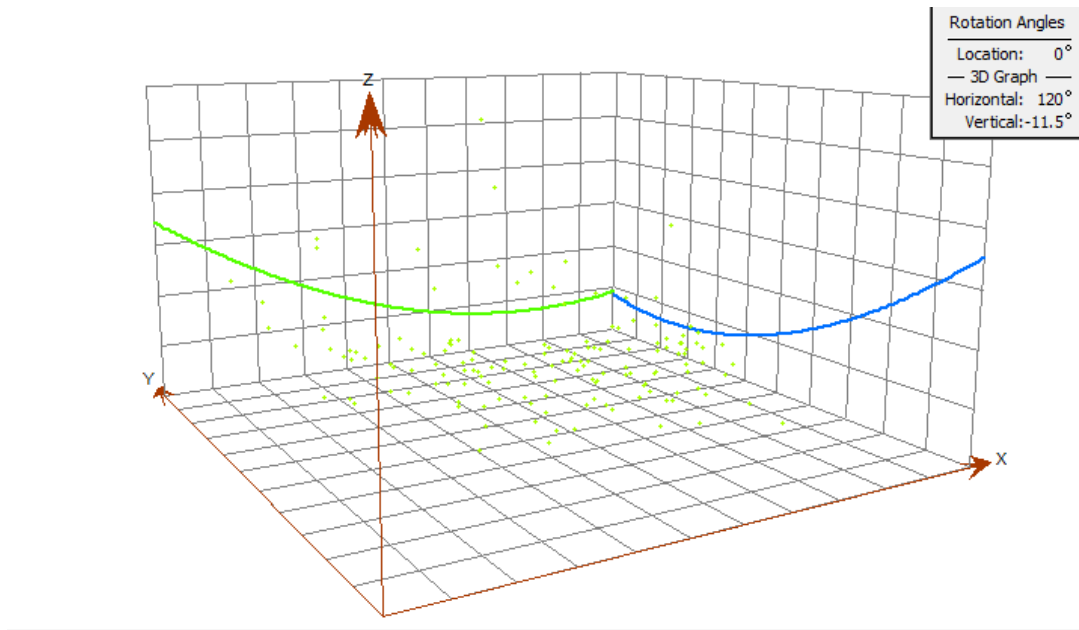


Figura 19: Gráfico de tendencia espacial: X-longitud; Y-latitud; Z: valor de precipitación.

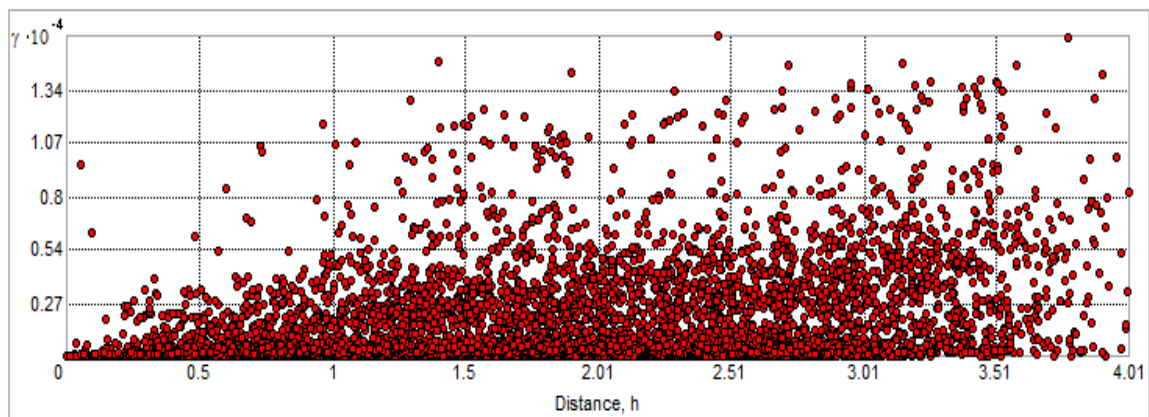


Figura 20: Semivariograma.

Asociado a estos resultados, se realizó la interpolación de los valores de precipitación utilizando como máscara el estado de Jalisco y su división territorial para identificar las variaciones por regiones (figura 21). Se aprecia un claro patrón (corroborado por el análisis exploratorio de los datos) de distribución de lluvias máximas, con un aumento longitudinal de noreste a suroeste.

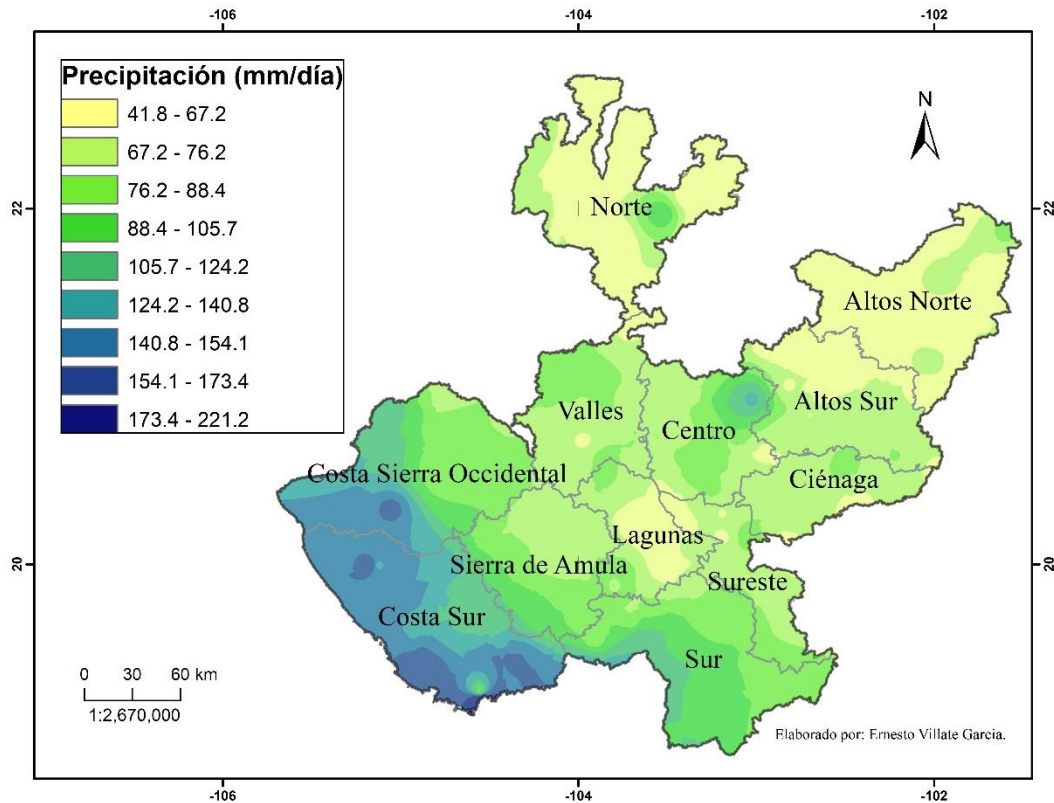


Figura 21: Distribución espacial de la precipitación máxima anual en 24 horas para un Pr5.

Para las zonas de Costa Sierra Occidental, Costa Sur y la porción occidental del Sur y Sierra de Amula (remitirse a la Figura 1 para relacionar las regiones) se puede esperar que ocurra al menos un episodio de precipitación en los próximos cinco años en el rango de 140 a 221 mm en 24 horas, sobre todo en zonas cercanas a la costa. Este resultado se deriva en gran medida de la influencia oceánica (con aumentos de los niveles de humedad relativa), al efecto orográfico causado por la Sierra Madre Sur (efecto Foehn) y al impacto de organismos atmosféricos propios de la zona como los ciclones tropicales. De hecho, la cuenca del océano Pacífico Oriental es la segunda más activa en cuanto a la formación anual de ciclones tropicales, y aunque estos sistemas no suelen tocar tierra en el estado de Jalisco, las bandas de alimentación de dichos fenómenos sí perturban el tiempo y conducen a eventos de precipitación extraordinarios.

Las regiones Norte, Altos Norte y Altos Sur presentan los valores más bajos, entre 40 y 60 mm en 24 horas aproximadamente, siendo climatológicamente más secas. Se encuentran

alejadas del Pacífico y reciben una subsidencia de los vientos asociada a la propia cadena montañosa y a una mayor influencia de los centros anticiclónicos continentales.

Resalta además una diferencia meridional en la porción central del estado, con valores más elevados hacia Valles y Centro y una disminución hacia Lagunas y el norte de la región Sueste.

3.2.3- Análisis espectral

En este apartado, como se indicó en la metodología, se busca una posible relación entre las frecuencias más energéticas del espectro de oscilaciones del ENSO y de las estaciones seleccionadas en cada una de las regiones del estado (Figura 22).

Para evaluar el ENSO, se utiliza el Índice Oceánico de “Él Niño” (ONI por sus siglas en inglés), disponible en el sitio web: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. En la figura 8, se observan dos picos de frecuencias más energéticas, correspondientes a períodos de 63.6 y 40.8 meses respectivamente. Por lo que, llevando estos resultados a una escala anual, el índice ONI tiene una periodicidad típica alrededor de los 5.3 y 3.4 años, resultado que guarda relación con las conclusiones de Trenberth (1997).

En cuanto a las regiones (Figura 23), en todos los casos se observa un rango de frecuencias energéticas que van desde 4.6 años en la zona Centro hasta los 6.4 años en la Sierra de Amula (franja roja), siendo la principal señal en siete de las regiones: Costa Sierra Occidental, Costa Sur, Norte, Sureste, Altos Norte, Altos Sur y Centro. Llama la atención que en cuatro de estos casos más energéticos el pico coincidió en los 5.3 años: Costa Sierra Occidental, Sureste, Altos Norte y Altos Sur. Por lo que existe una relación entre la frecuencia principal con que se presenta el fenómeno ENSO (alrededor de los 5.3 años a partir del índice ONI) con este rango de frecuencias observado en todas las regiones.

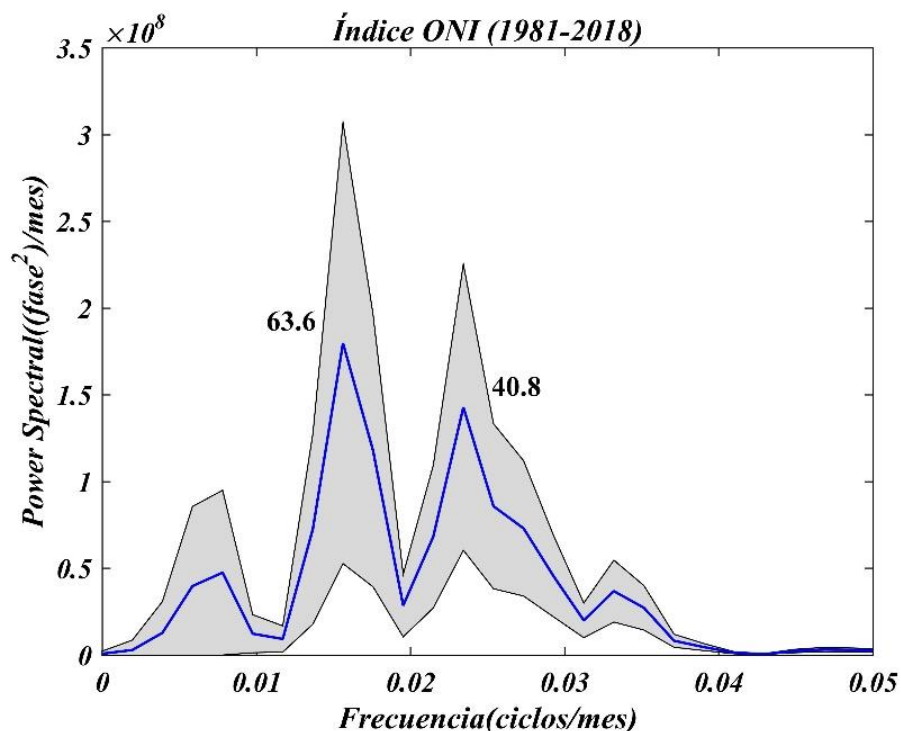


Figura 22: Espectro de frecuencias del índice ONI en el período 1981-2018.

Destaca otra banda de picos energéticos localizado entre 2.1 años en Lagunas y 3.3 años en Altos Norte (franja azul). Estos períodos son principales para sus respectivas series temporales en cinco regiones: Sierra de Amula, Sur, Valles, Lagunas y Ciénaga. En este escenario, la relación con la segunda frecuencia más energética del ENSO (3.4 años) no es tan evidente como en el caso anterior. Sin embargo, considerando el grado de confianza bajo el cual se realiza el análisis (95%), y la variabilidad que presenta la oscilación en cuestión, el nexo se considera aceptable.

En cuanto a la distribución espacial, estos picos de frecuencias energéticas no exhiben un patrón evidente, mostrando una señal relativamente homogénea en toda el área. De ahí que no se puede discernir con claridad una mayor o menor influencia del ENSO por regiones en el estado de Jalisco.

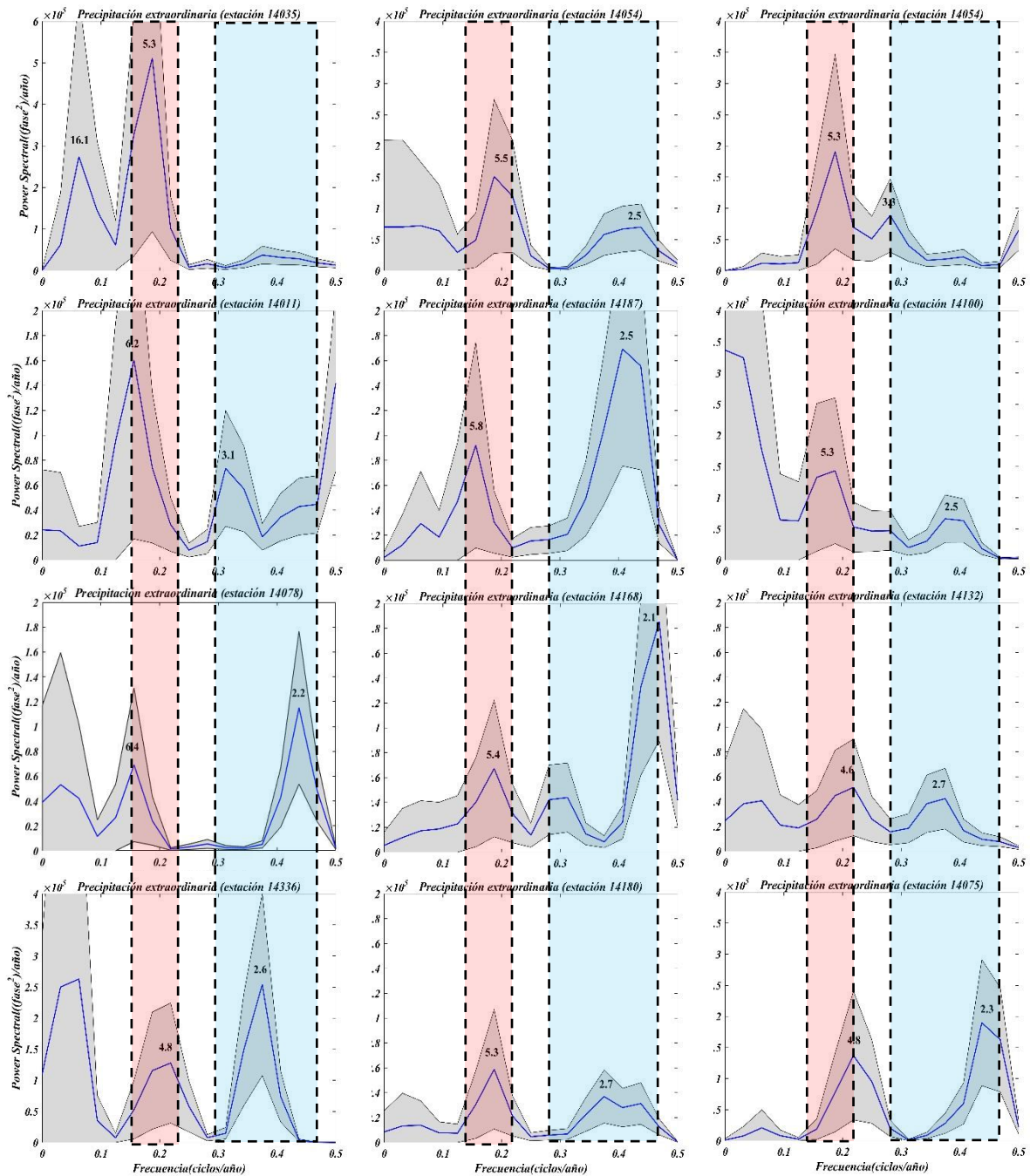


Figura 23: Espectro de frecuencias de cada una de las estaciones representativas para cada región. Las bandas roja y azul indican rangos de frecuencias.

3.3- Temporal de lluvias en Jalisco

Las condiciones climatológicas de una región determinan, entre otros factores, la variabilidad anual de precipitación. Específicamente en los trópicos y parte de los subtrópicos, la energía proveniente del sol mayoritariamente se transforma en calor latente, la cual permite los cambios de fases del agua hacia estados más energéticos. Tal es el caso de la evaporación, de ahí que en dichas regiones planetarias sea donde ocurran más episodios de lluvia. Por lo general, en el ciclo anual se presentan patrones unimodales (con un período menos lluvioso que otro) y bimodales (donde se pueden discernir hasta cuatro estaciones de acuerdo con los acumulados pluviales).

En Jalisco, de acuerdo con una revisión hemerográfica entre los principales diarios y revistas regionales, además de la experiencia popular, se pueden identificar dos estaciones bien marcadas: un período lluvioso, donde se da más del 90% de los acumulados, y uno seco con prácticamente ausencia de lluvia.

Esta condición influye en casi la totalidad de los renglones socio-económicos, modulando las actividades anuales y cobra relevancia, especialmente, cuando se refiere a la planificación de los procesos productivos de la agricultura.

La ya mencionada complejidad orográfica del estado, sus regiones costeras e influencia desigual de fenómenos atmosféricos de diferentes latitudes, pueden conducir a una variabilidad espacial en las fechas de inicio y fin del temporal, así como en la precisión y regularidad con que se presentan año por año.

Los instrumentos de gestión del riesgo requieren estudios que esclarezcan dichas interrogantes ya que son un punto de partida para acciones de prevención de desastres asociados con las lluvias de temporal.

3.3.1- Inicio y fin

Las fechas de comienzo y fin de un período natural, como las lluvias, suelen ser construcciones estadísticas que responden a la climatología de la propia variable. De ahí que, al igual que su génesis, presenten una variabilidad espacio-temporal.

La cobertura espacial de un resultado de este tipo está vinculada con la resolución de la base de datos empleada y las parametrizaciones que se realicen. En este estudio, como se detalló en la metodología, y derivado de los resultados anteriores, se emplean los datos pñtadas de CHIRPS. Por tanto, el objetivo es mostrar fechas de inicio y fin del temporal en cada punto de control esparcidos cada 0.05°.

La figura 24 indica el patrón espacial del inicio del temporal en Jalisco. Se observa una heterogeneidad en los valores, los cuales oscilan entre finales de mayo y mediados de junio. El temporal empieza primero en la porción noreste del estado, sobre todo en las regiones de Altos Norte y Altos Sur, donde ya finalizando mayo se presentan acumulados con tendencia creciente.

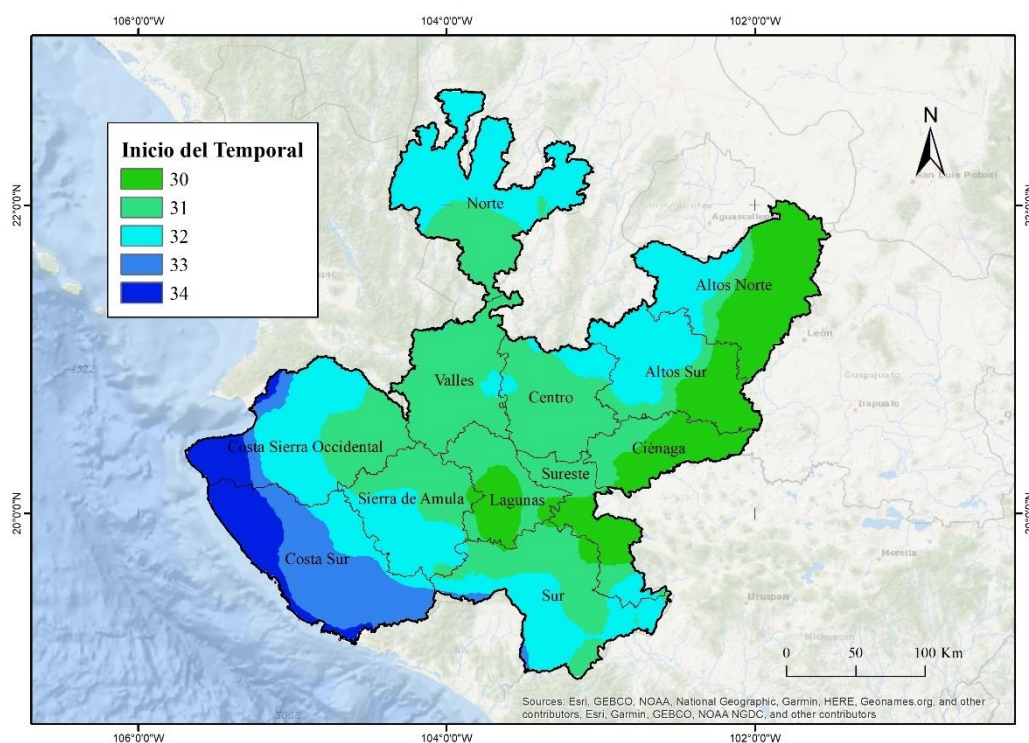


Figura 24: Inicio del temporal en el estado de Jalisco. 30- últimos cinco días de mayo, 31- primera pñtada de junio, 32- segunda pñtada de junio, 33- tercera pñtada de junio, 34- cuarta pñtada de junio. Fuente: Elaboración propia.

La región central jalisciense exhibe una variabilidad con inicios desde el mínimo hasta el día 10 de junio. Precisamente, en la región Centro, donde está ubicada el AMG, el temporal comienza generalmente entre el cinco y el diez de junio. Por su parte, la región Norte es más

homogénea, con fechas iguales al Centro. El temporal en las zonas cercanas a la costa no comienza hasta la segunda mitad del mes de junio, sobre todo en los extremos oeste de Costa Sur y Costa Sierra Occidental

Se visualiza así un cierto patrón zonal establecido, con un temporal que comienza primero al este en la región de los altos y se retrasa a medida que se acerca las costas de Jalisco; la variación meridional es menos perceptible.

En cuanto al final del período lluvioso, la Figura 25 muestra un rango mayor de valores, pudiendo identificarse cierto patrón. El temporal suele terminar antes en el norte y el oriente del estado, incluyendo las regiones Valles, Centro y Ciénaga, alrededor de los primeros días de octubre, a excepción de Altos Norte, donde se puede extender hasta mediados de mes.

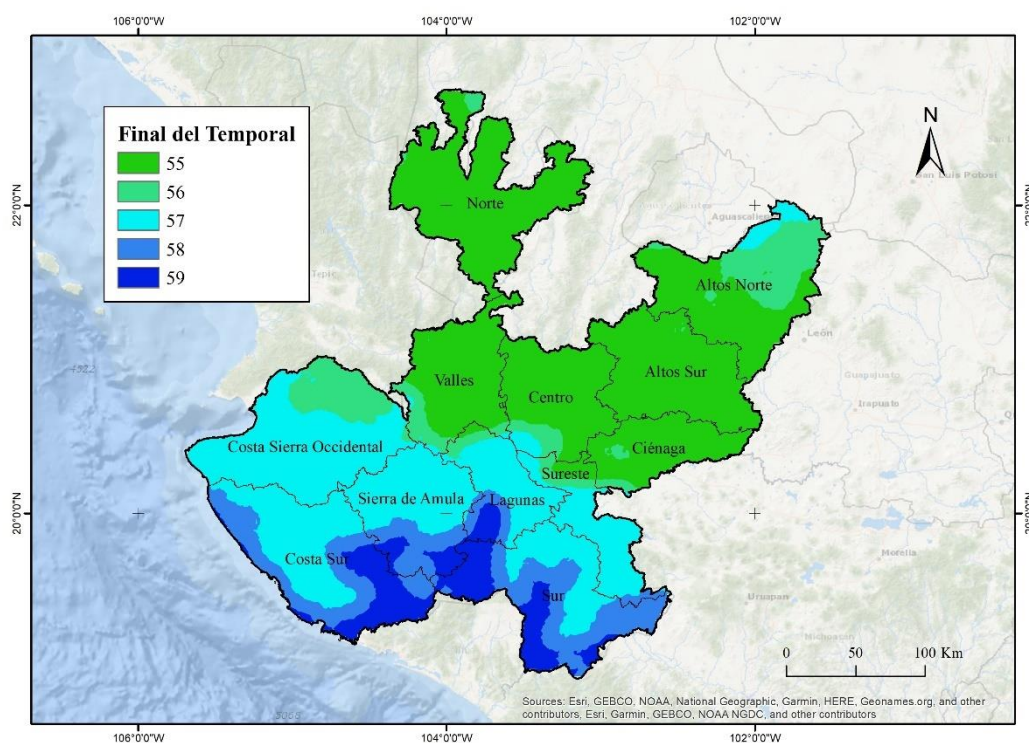


Figura 25: Final del temporal en el estado de Jalisco. 55- del 1 al 5 de octubre, 56- del 6 al 10 de octubre, 57- del 11 al 15 de octubre, 58- del 16 al 20 de octubre, 59- del 21 al 25 de octubre. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, las lluvias se mantienen incluso hasta finales de octubre en la otra porción del estado (sur y oeste). Esta condición se asocia fundamentalmente a dos aspectos: el

movimiento meridional de la Zona Intertropical de Convergencia y el final de la temporada ciclónica en el Pacífico Oriental, la cual se extiende hasta el mes de noviembre.

Una cuestión que llama la atención en ambos mapas es una zona ubicada en el municipio de Tapalpa, en la región de Lagunas, donde el temporal tiene características peculiares. Ahí, la época de lluvias tiene su mayor extensión temporal, comenzando a finales de mayo y cesando hasta finales de octubre. Cabe destacar que, en un primer análisis de tipo y uso de suelo, así como la vegetación, no resaltan características específicas (en relación con el resto de dicha región).

En cuanto al pico del temporal, o sea, el mes donde se produce la máxima precipitación en cinco días (Figura 26), también es posible identificar visualmente un cierto patrón espacial. El mes de junio debe ser el foco de atención por la mayoría de las regiones, sobre todo hacia el centro y noreste del territorio. Esta situación coincide con el inicio del temporal más temprano en dichas zonas, por lo que las fuertes lluvias van a caer sobre suelos muy secos, impermeables, disminuyendo la infiltración y por tanto aumentando el escurrimiento y probabilidad de inundaciones.

Las zonas costeras suelen recibir las máximas lluvias para el mes de agosto, también en concordancia con el retraso del temporal y una mayor actividad de depresiones y ciclones tropicales en la cuenca del Pacífico mexicano. Llama la atención que, a pesar de que en julio suele producirse una caída en los acumulados de precipitaciones (conocido como “canícula”), este mes está presente en varias regiones. Sin embargo, este suceso tiene una explicación desde el punto de vista estadístico, toda vez que los meses se determinaron a partir del promedio en el período de estudio y en el mapa se visualiza como generalmente está en la transición entre junio y agosto.

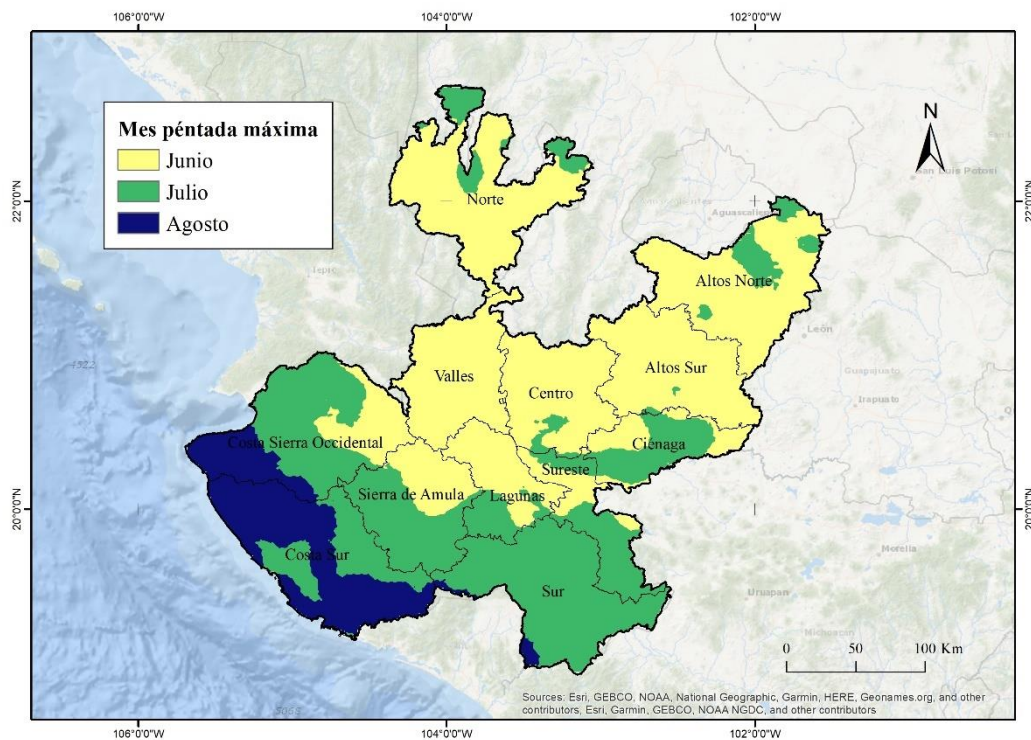


Figura 26: Distribución espacial del mes donde se produce el mayor acumulado anual en cinco días.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.1- Certidumbre

Como ya se mencionó, estas fechas no pueden evaluarse como est ticas, sino que constituyen una aproximación a lo que generalmente ocurre. La variabilidad de la propia precipitación va más allá de estos resultados. Cada año los especialistas del clima evalúan modelos atmosféricos globales, además de condiciones a gran escala como oscilaciones atmosféricas, para pronosticar dichos cambios en estas fechas promedio.

En la mayoría de las regiones del estado, el inicio de las lluvias puede oscilar entre 5 y 10 días (Figura 27), lo cual representa un margen aceptable para planificaciones de tipo agrícola, así como labores de mantenimiento de redes pluviales, entro otras. Este valor incluso es más preciso en algunas zonas de C naga, Centro, Sur, Costa Sur y Costa Sierra Occidental.

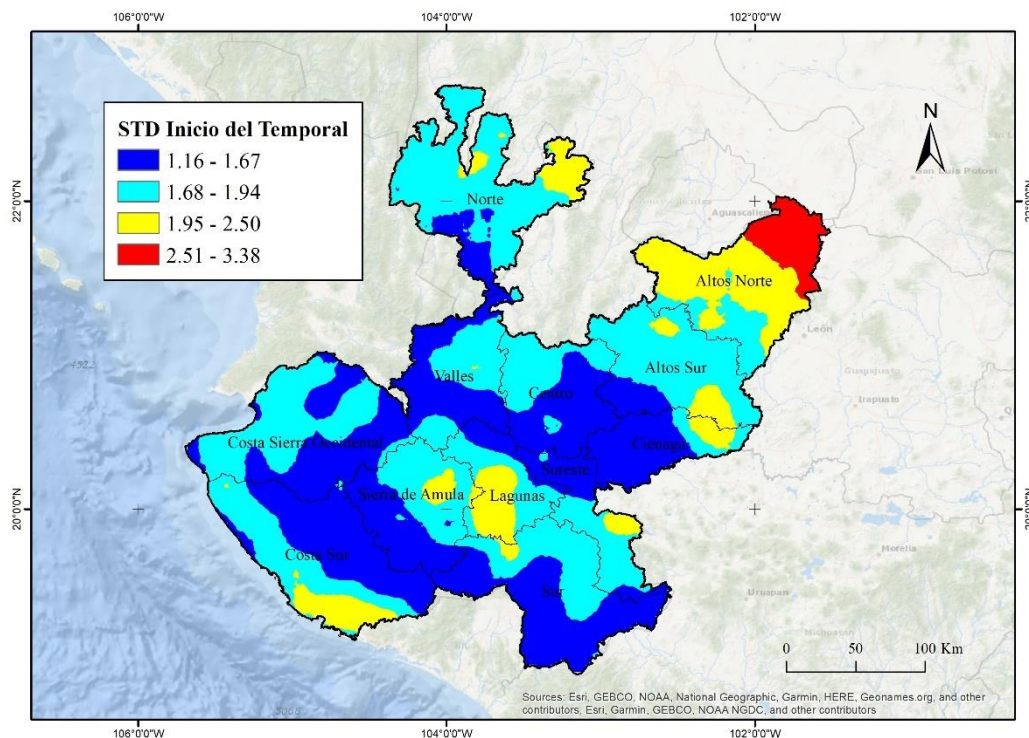


Figura 27: Desviación estándar (STD) del inicio de temporal. Los valores refieren a péntadas.
Fuente: Elaboración propia.

Al contrario, la incertidumbre crece hacia Altos Norte y en ciertas porciones de Lagunas, Altos Sur, Costa Sur y el extremo oriental del Norte, donde puede ser incluso superior a una quincena. En este caso, cobra relevancia los pronósticos de inicio del temporal, por lo que se recomienda un interés adicional en esta información sobre todo por parte de los agricultores e instituciones como Protección Civil.

Las fechas del fin del temporal son más homogéneas espacialmente, aunque más inciertas (Figura 28). En este caso se pueden presentar cambios de +/- 10 o 15 días en gran parte del territorio. Incluso, en las zonas más al norte del estado y algunos puntos en Costa Sur, Sierra de Amula y Lagunas, se visualizan valores superiores al mes (4 pentadas o más).

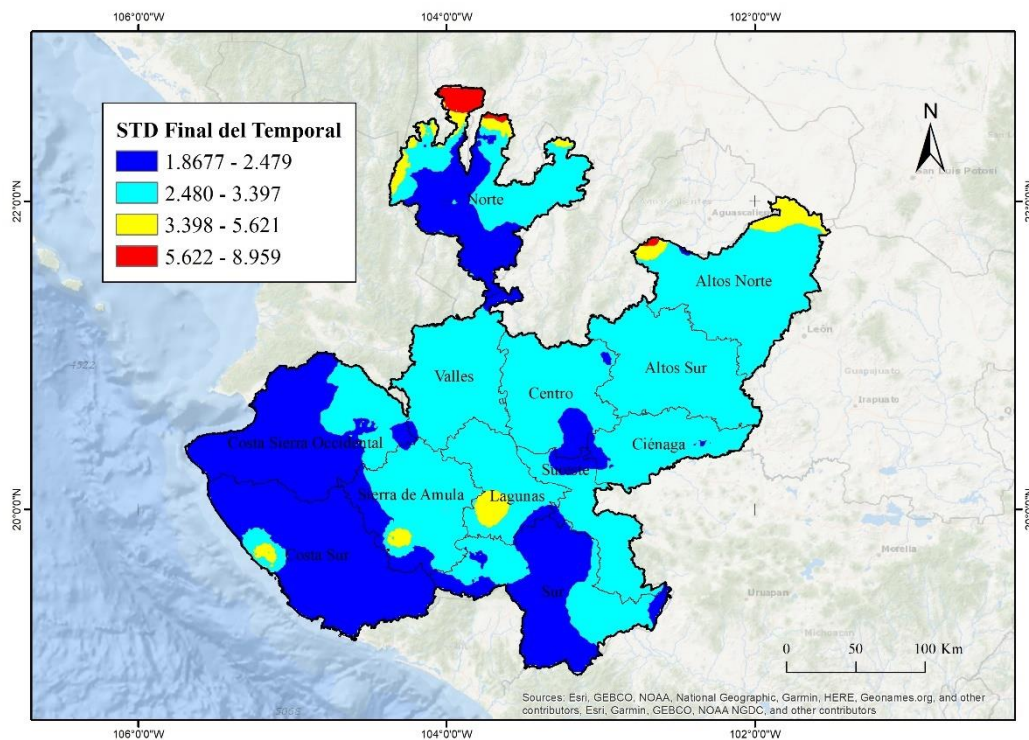


Figura 28: Desviación estándar del final de temporal. Los valores refieren a péntadas. Fuente: Elaboración propia.

Este patrón está condicionado por la influencia de fenómenos meteorológicos de latitudes medias en estos meses de transición, así como por masas de aire provenientes del norte que imponen sus características sobre la zona. Además, las zonas áridas suelen tener una mayor inestabilidad en la precipitación.

La figura 29 muestra cómo se comporta la incertidumbre para el caso del mes con la péntada máxima anual. Mientras que en las regiones Valles, Centro, Ciénaga, los Altos y el Norte, el mes suele ser estable, con una desviación estándar inferior a uno, en la porción centro sur del estado la variabilidad puede ser de hasta dos meses. Esta región crítica coincide con la porción de transición (mes de julio) que se mencionó en el análisis anterior.

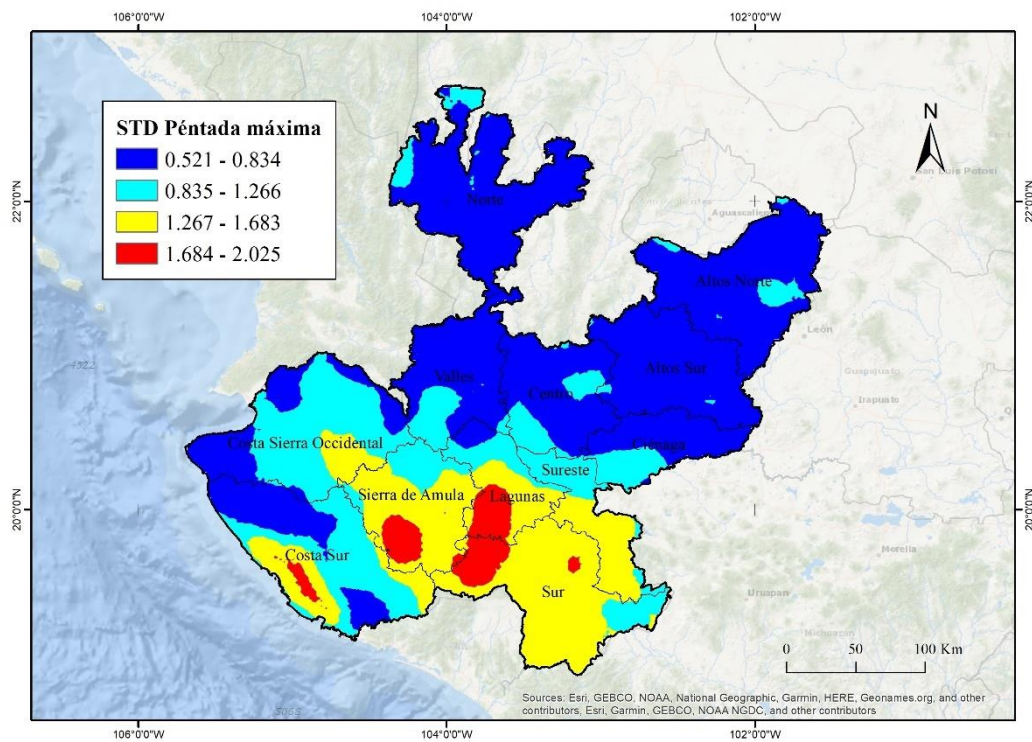


Figura 29: Desviación estándar del mes con máxima lluvia en cinco días. Los valores refieren a meses. Fuente: Elaboración propia.

4- Análisis Integrador

Este capítulo persigue como objetivo obtener el análisis integrador del riesgo con la inclusión de la exposición física y la vulnerabilidad al ya definido peligro. El mismo se secciona en dos partes dedicadas a cada uno de dichas componentes.

4.1- Exposición

En primer lugar, se procede a mapear cada uno de los indicadores de exposición para así tener un acercamiento a sus distribuciones espaciales. En todos los casos se establecen cinco clases con el método estadístico de cuantiles.

En general, todas las variables (Figuras 30, 31 y 32) toman valores de clase “Muy alta” en la región central del estado, específicamente en los municipios principales del AMG, al igual que en el caso de Puerto Vallarta. La excepción estuvo en la tasa de crecimiento de Guadalajara, la cual fue “Muy baja” en relación con el resto de los municipios. Valores elevados se aprecian para la zona de los altos de Jalisco, mientras que en el resto del estado las distribuciones fueron más heterogéneas. Con dichos antecedentes, se construye un mapa combinado (Figura 33).

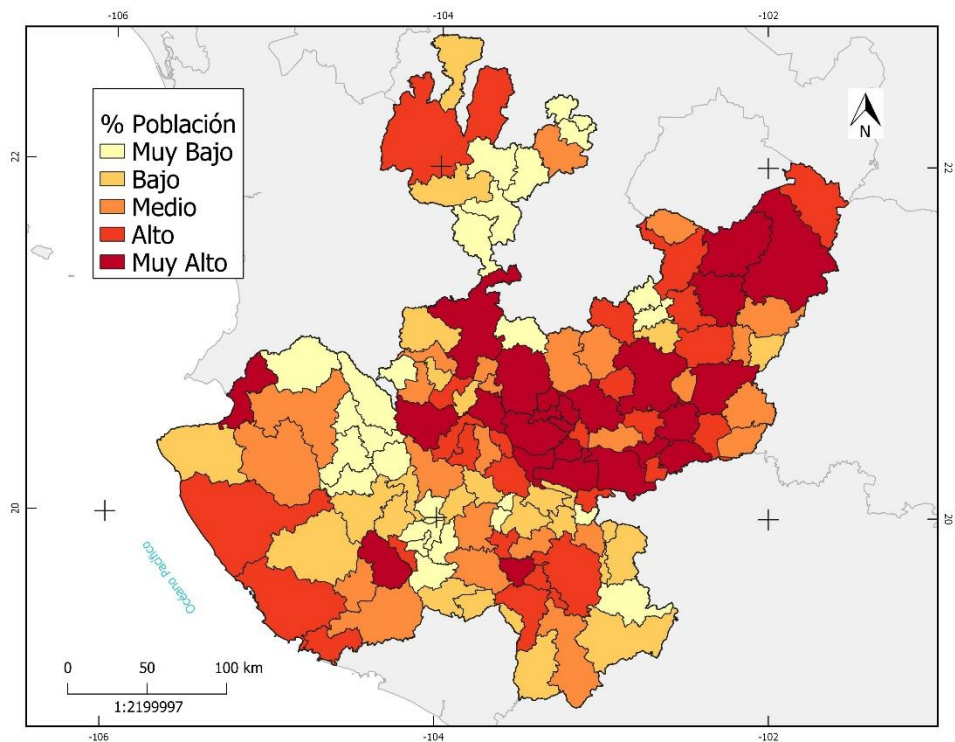


Figura 30: Distribución del porcentaje de población del total del estado de Jalisco que presenta cada municipio.

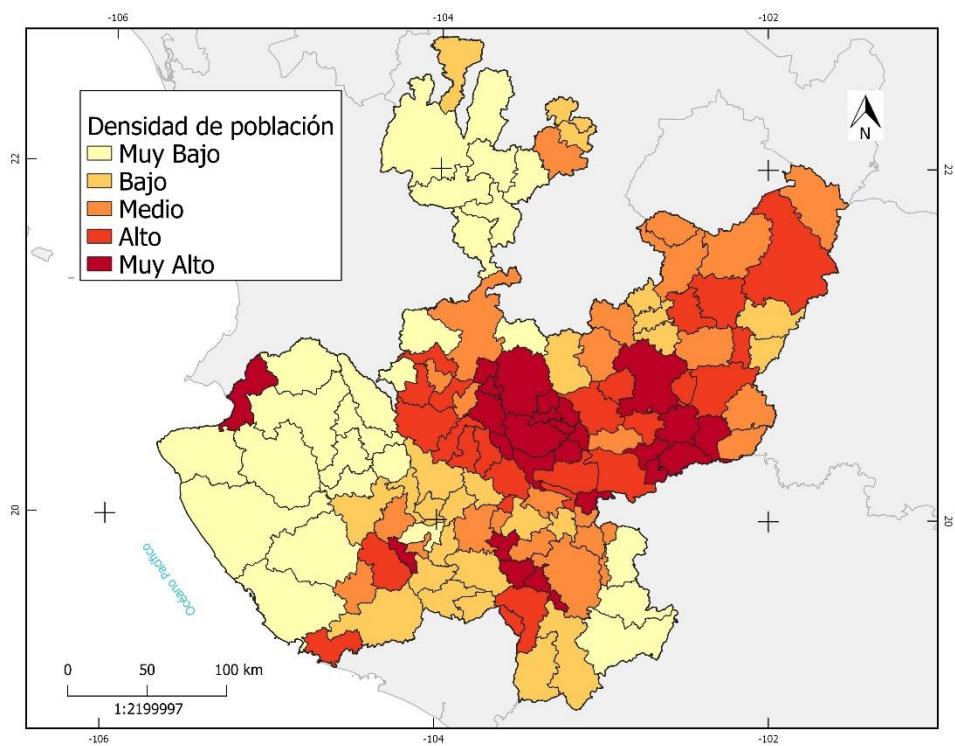


Figura 31: Distribución de la densidad de población por km2 por municipios.

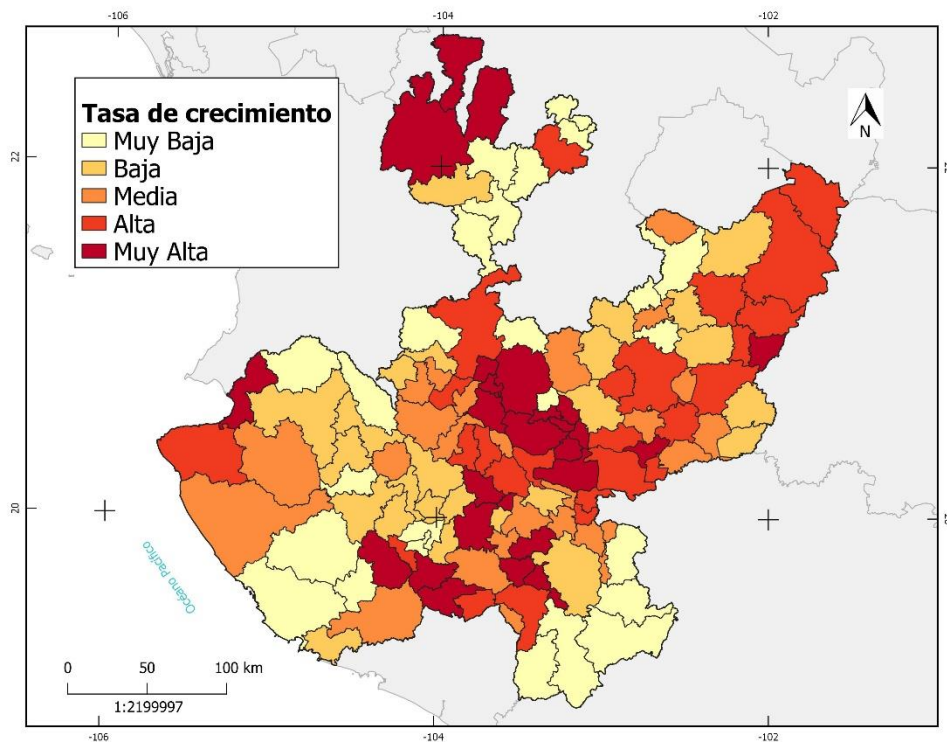


Figura 32: Distribución de la tasa de crecimiento de la población por municipios en el período 2010-2020. La tasa indica el crecimiento promedio entre cada uno de los años.

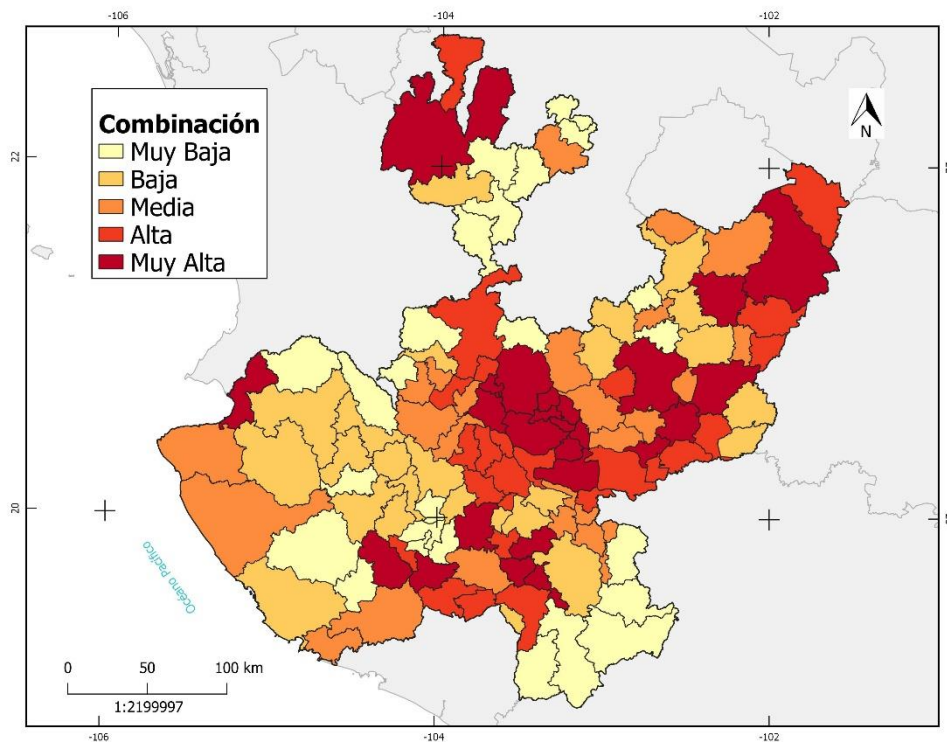


Figura 33: Combinación de los indicadores de exposición y porcentaje de población total, densidad de población y tasas de crecimiento, por municipios.

El próximo paso es introducir el rango de incidencia del peligro. Este análisis se realiza con los dos métodos presentados en el apartado metodológico y para cada uno de los indicadores de peligro.

4.4.1- Configuración de niveles de exposición y peligro

En este apartado se procede a establecer las cuatro configuraciones que indican la relación entre los niveles (altos y bajos) de los indicadores de exposición (se toma el producto combinado) y del peligro (Pr5 y Tendencia).

En la tabla 5 se observa que, en el caso de la precipitación máxima con período de retorno de cinco años, la configuración predominante es Baja exposición y Alta incidencia, con cerca de la mitad de municipios, mientras que las restantes configuraciones están balanceadas. Para la Tendencia, los municipios están divididos 50-50 entre las configuraciones que involucran Baja exposición y Alta exposición. Por lo tanto, en el primer caso la exposición de las estructuras suele ser dominante, mientras que en el segundo el indicador de peligro tiene un peso mayor en las configuraciones.

Tabla 6: Distribución de la exposición de acuerdo a las cuatro categorías establecidas.

Peligro	BE/BI	BE/AI	AE/BI	AE/AI
Pr5	24.8 %	51.2 %	28.0 %	21.6 %
Tendencia	33.6 %	16.8 %	16.8 %	32.8 %

Nota. BE – Baja exposición, BI – Baja incidencia, AE – Alta exposición, AI – Alta incidencia.

La distribución espacial de estos resultados se aprecia en las figuras 34 y 35. Se considera que la combinación AE/AI representa una mayor exposición a las precipitaciones extremas, mientras que BE/BI es lo opuesto. En los casos de BE/AI y AE/BI permite discernir hacia qué aspecto debe enfocarse las políticas de prevención de riesgos, sin embargo, no permiten esclarecer el nivel de exposición final.

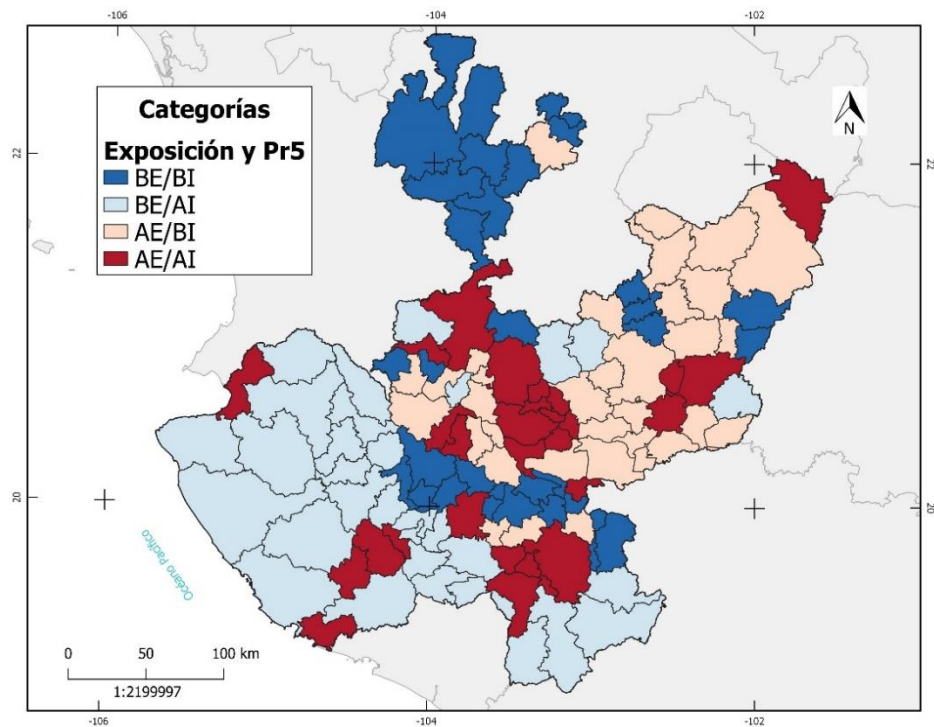


Figura 34: Composición de categorías de acuerdo con niveles altos y bajos de exposición y precipitación máxima anual en 24 horas para un período de retorno de cinco años (Pr5) por cada municipio.

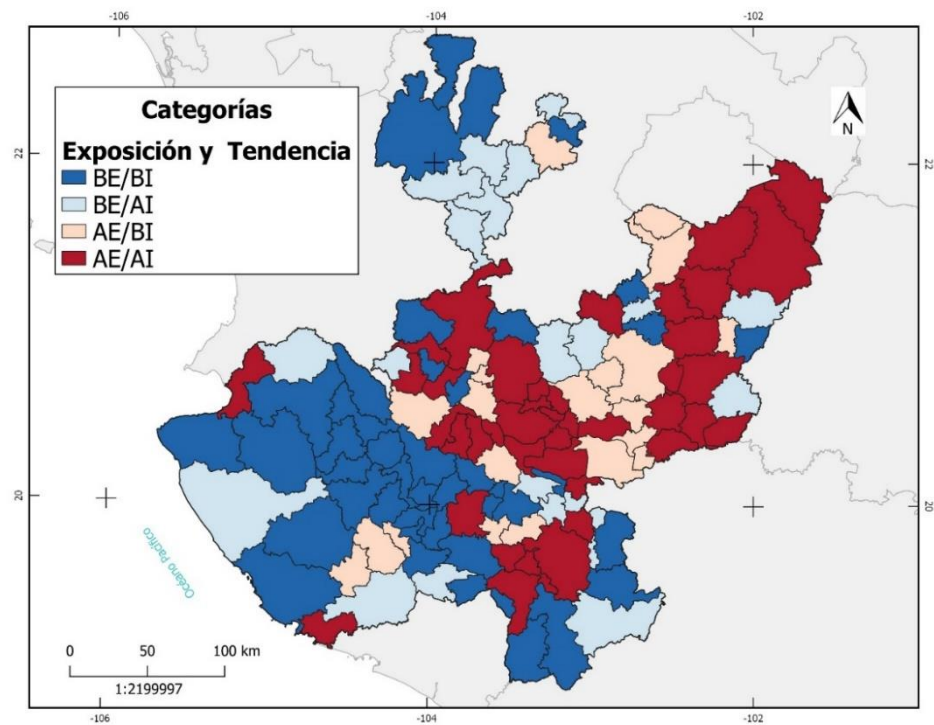


Figura 35: Composición de categorías de acuerdo con niveles altos y bajos de exposición y tendencia de las precipitaciones máximas por cada municipio.

4.4.2- Niveles de exposición

Los niveles de exposición se trabajan a partir del segundo método, el cuál sí permite establecer una categorización comparativa para cada una de las variables de exposición de manera individual y combinada.

La exposición del porcentaje de población por municipios a los máximos anuales es muy alta hacia la costa, el centro y en algunos municipios de las porciones sur y oriental (Figura 36). Mientras que, en relación con la tendencia (Figura 37), la exposición más alta está concentrada mayormente en la porción centro-oriental del territorio. El norte del estado no tiene una alta exposición a ninguno de los indicativos de peligro tratados.

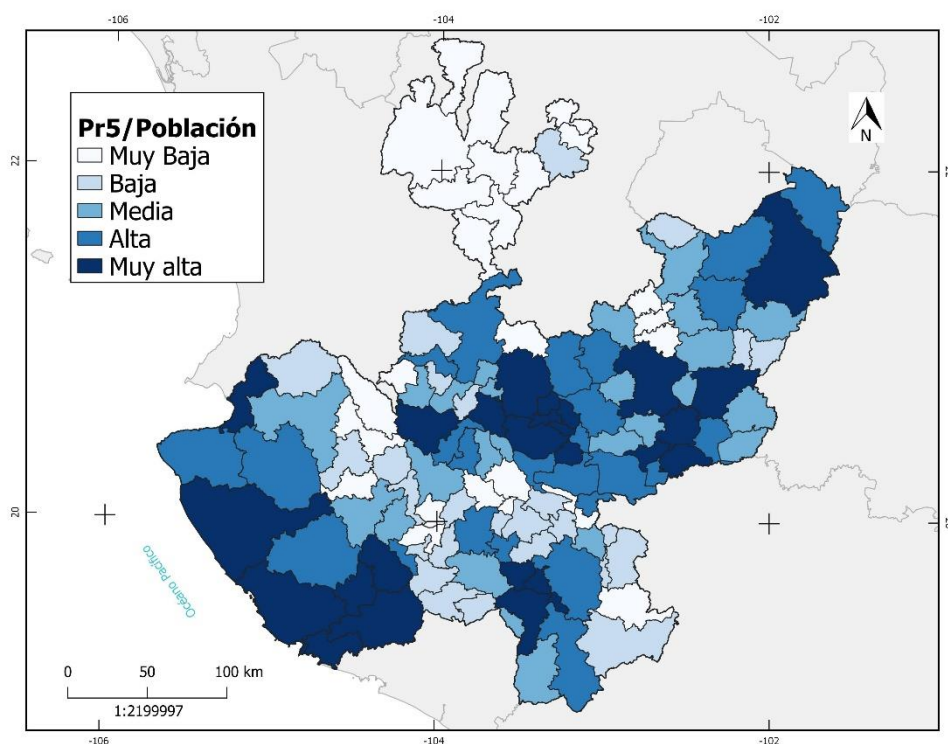


Figura 36: Exposición del porcentaje de población por municipio a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.

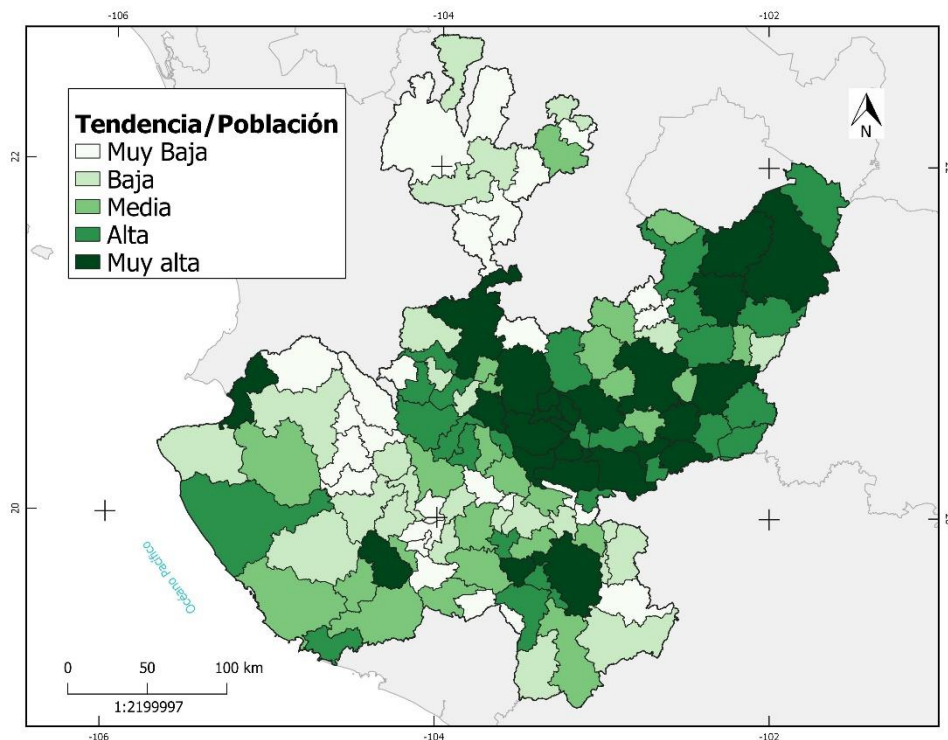


Figura 37: Exposición del porcentaje de población por municipio a la tendencia de lluvias máximas. En cuanto a la densidad poblacional, ambos mapas (Figura 38 y 39) exhiben patrones muy similares. La distribución de esta variable tiene extremos bien marcados, lo que se refleja y es predominante al combinarla con cualquiera de los peligros. Se recomienda en futuros análisis que, para visualizar mayor detalles y diferencias entre los productos, se remuevan los municipios con los picos de densidad.

La tasa de crecimiento retoma las diferencias en dependencia del peligro que se trate. Para el Pr5 (Figura 40 y 41), la exposición se localiza mayormente en los municipios costeros, mientras que, para Tendencia, los valores más elevados están diseminados entre la porción central y los altos de Jalisco. Una cuestión a señalar es que este es el primer caso donde los resultados no son iguales en los seis municipios principales del AMG.

Los dos productos finales que se obtienen engloban los análisis anteriores ya que se unen las variables de exposición y se relacionan con cada uno de los indicadores de peligro (Figuras 42 y 43). La exposición combinada al Pr5 es muy alta en los municipios costeros, respondiendo sobre todo a la magnitud del peligro en dicha zona, además de sobresalir

también en el AMG. Para la región Norte es de baja a muy baja, mientras que para los altos y para el sur la distribución es heterogénea, desde valores muy bajos hasta altos.

Con respecto a la tendencia de las precipitaciones máximas, la exposición muy alta está localizada mayormente en la porción central y al este del territorio jalisciense. Al igual que en el mapa anterior, la región norte toma valores de media a baja exposición, mientras que al oeste solo Puerto Vallarta toma valores de muy alta. El primer producto sirve de herramientas para el presente, mientras que el segundo brinda una aproximación sobre un escenario futuro y así poder optimizar los instrumentos de gestión ante este riesgo potencial.

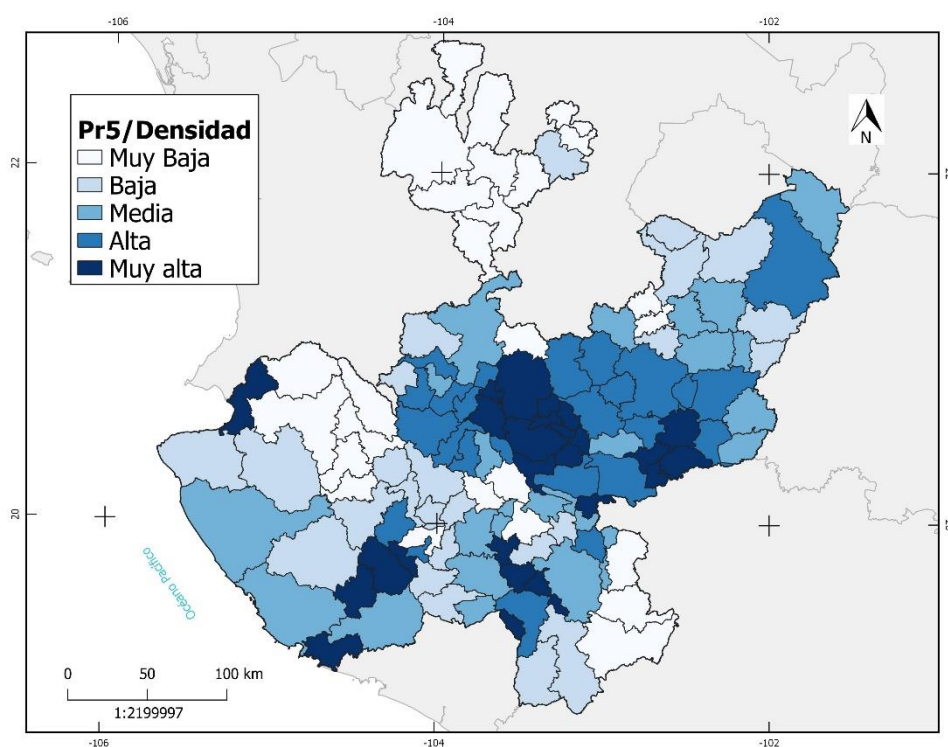


Figura 38: Exposición del porcentaje de densidad poblacional por municipio a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.

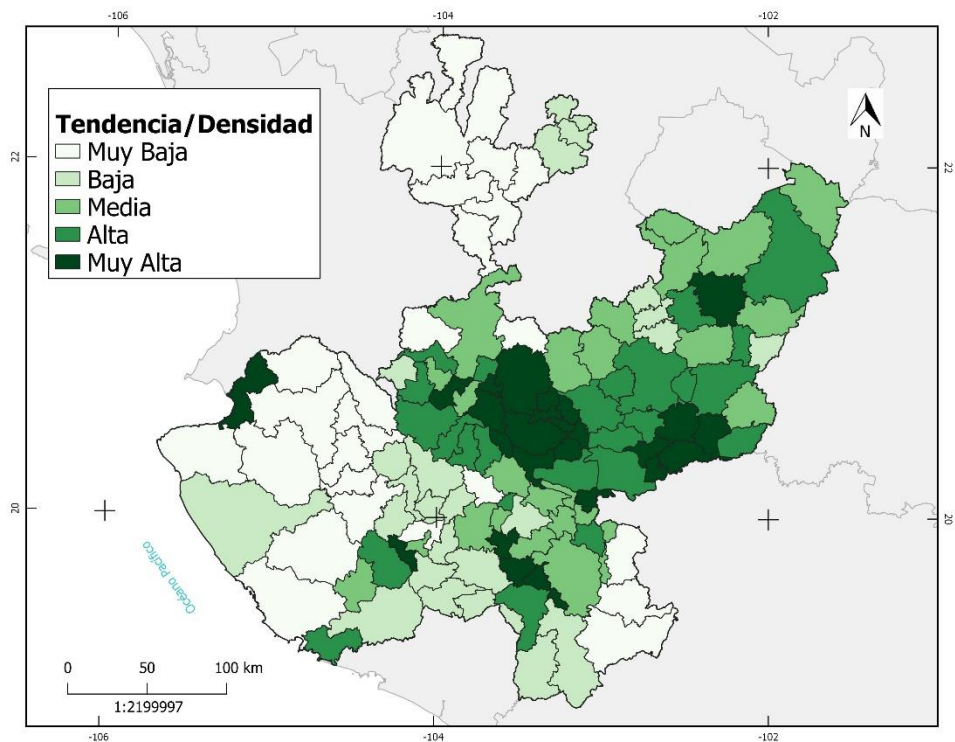


Figura 39: Exposición del porcentaje de densidad poblacional por municipio a la tendencia de lluvias máximas.

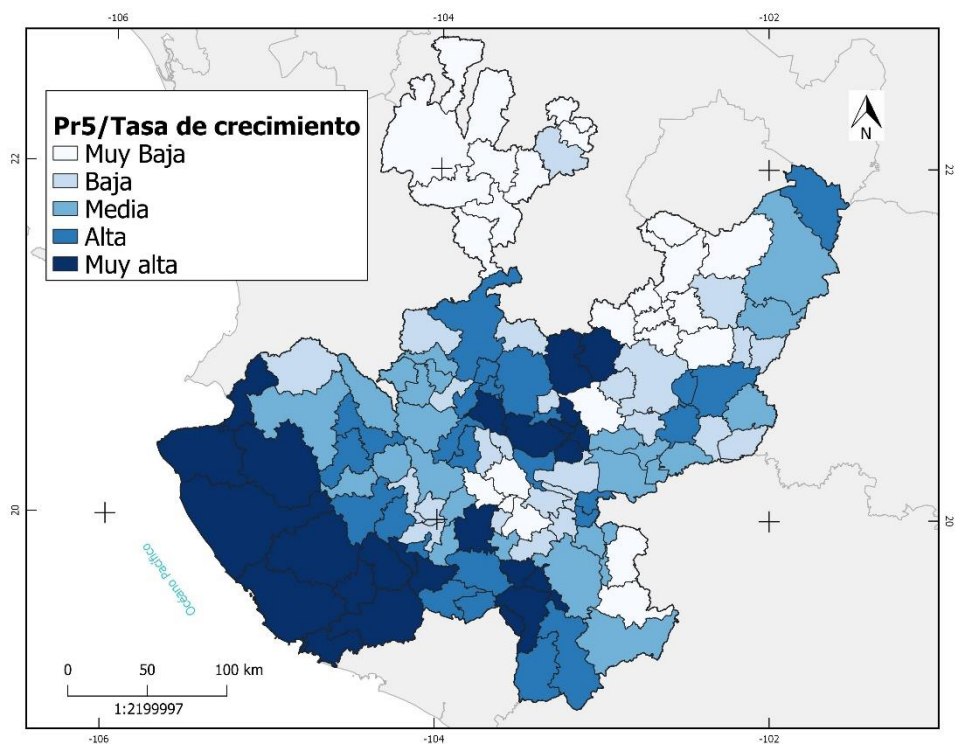


Figura 40: Exposición de la tasa de crecimiento poblacional por municipio a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.

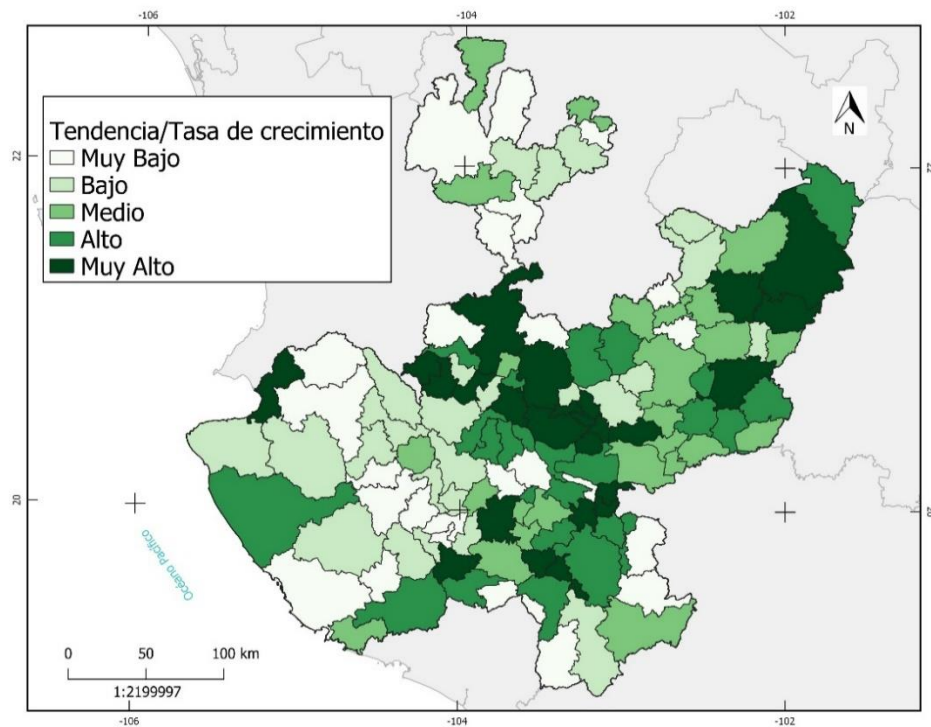


Figura 41: Exposición de la tasa de crecimiento poblacional por municipio a la tendencia de lluvias máximas.

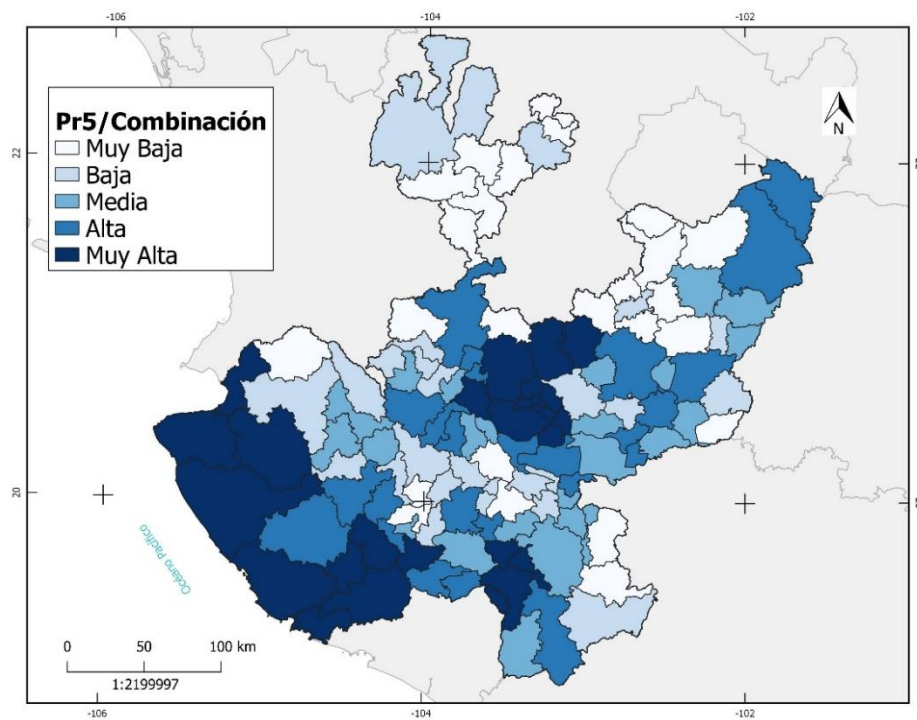


Figura 42: Exposición producto a la combinación del porcentaje poblacional, la densidad poblacional y la tasa de crecimiento poblacional, a las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años.

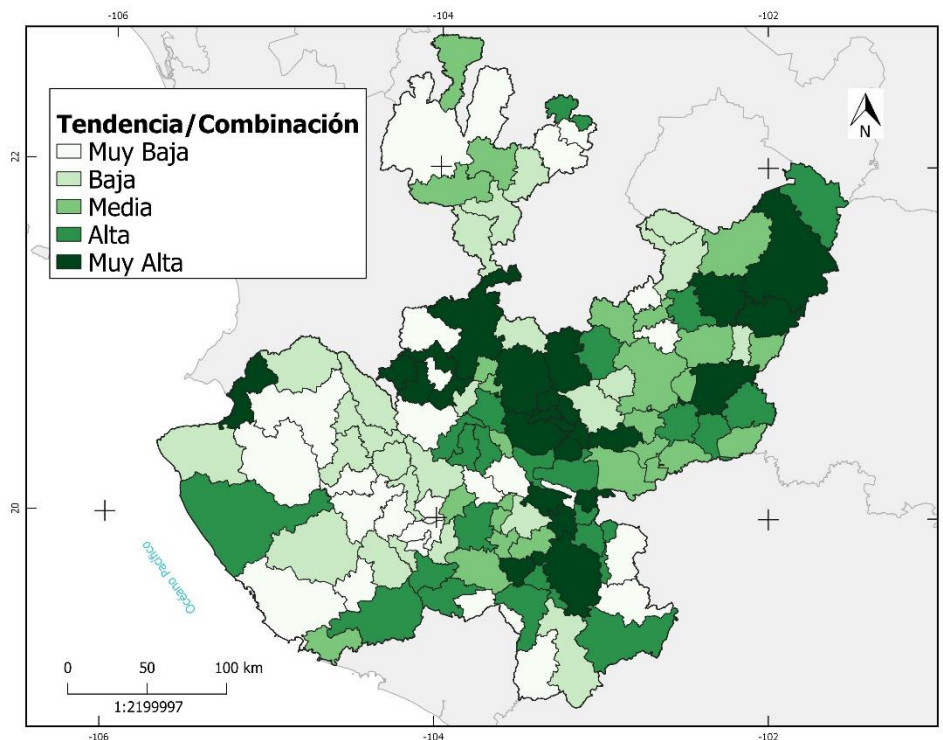


Figura 43: Exposición producto a la combinación del porcentaje poblacional, la densidad poblacional y la tasa de crecimiento poblacional, a la tendencia de lluvias máximas.

4.2- Vulnerabilidad

La vulnerabilidad estructural ante determinado peligro es, como ya se mencionó, independiente a la frecuencia de impacto de este. Sobre esta base, en los siguientes productos no se incluyen los dos indicadores de peligro.

El análisis individual de cada indicador (Figuras 44, 45, 46, 47 y 48) muestra distribuciones espaciales similares, lo cual se refleja en el producto final de vulnerabilidad (Figura 49). El norte de Jalisco (a excepción del municipio de Colotlán), presenta una vulnerabilidad muy alta. Esta es una región generalmente pobre y esto deriva en condiciones estructurales desfavorables para enfrentar el impacto de las lluvias extremas. El occidente del estado y el extremo sur se unen a esta preocupante realidad, donde solo unos pocos municipios (dentro de ellos Puerto Vallarta y Autlán de Navarro) escapan de una vulnerabilidad entre alta y muy alta.

Los seis municipios principales del AMG, a pesar de la exposición muy alta, exhiben una vulnerabilidad de muy baja a baja. Este resultado concuerda con el planteamiento teórico de

la presente investigación, en el cual se aclara que ambos términos no siempre son directamente proporcionales. Por su parte, la zona centro oriental de Jalisco exhibe un patrón heterogéneo, aunque las clasificaciones de alta y muy alta son las menos frecuentes.

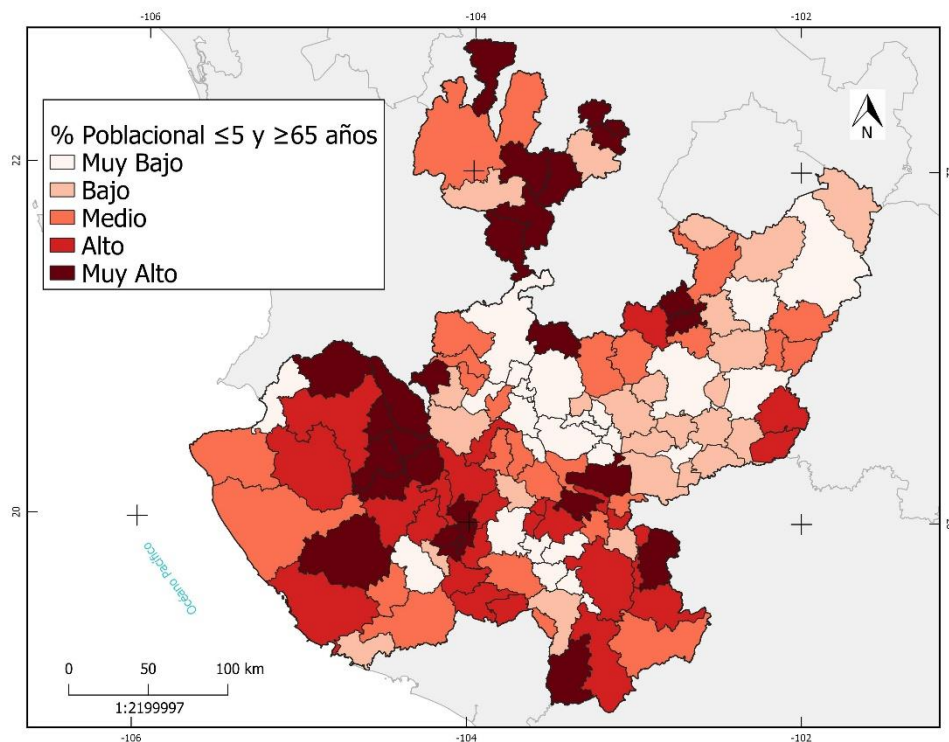


Figura 44: Porcentaje de la población menor de cinco años y mayor de 65 con respecto a total de cada municipio.

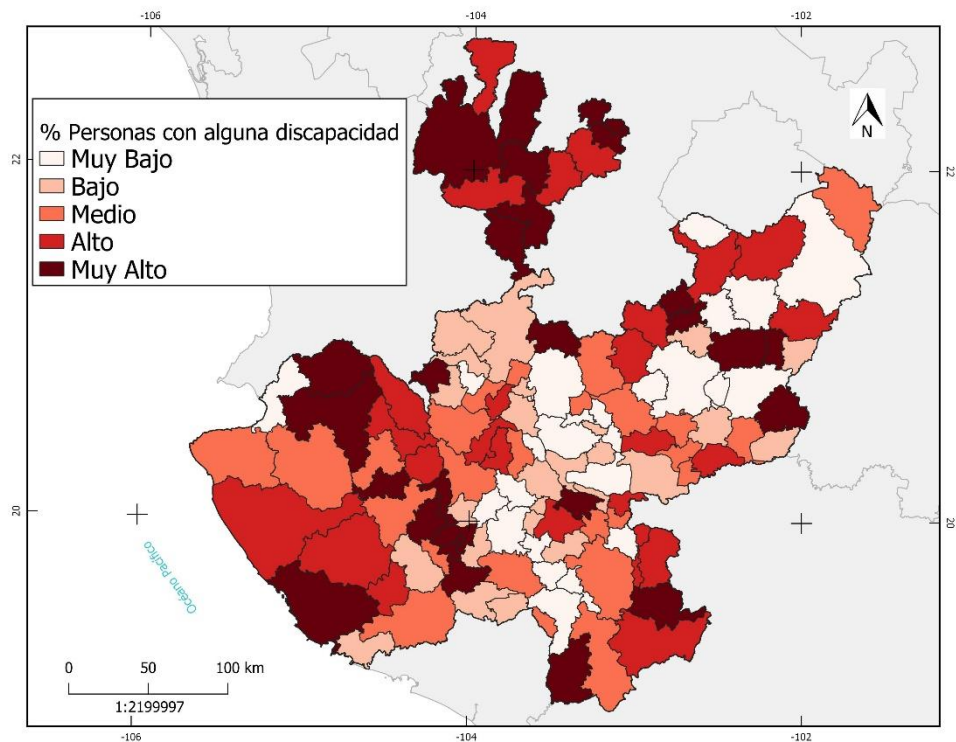


Figura 45: Porcentaje de personas con alguna discapacidad (visual, auditiva, motora y lingüística) con respecto al total de cada municipio.

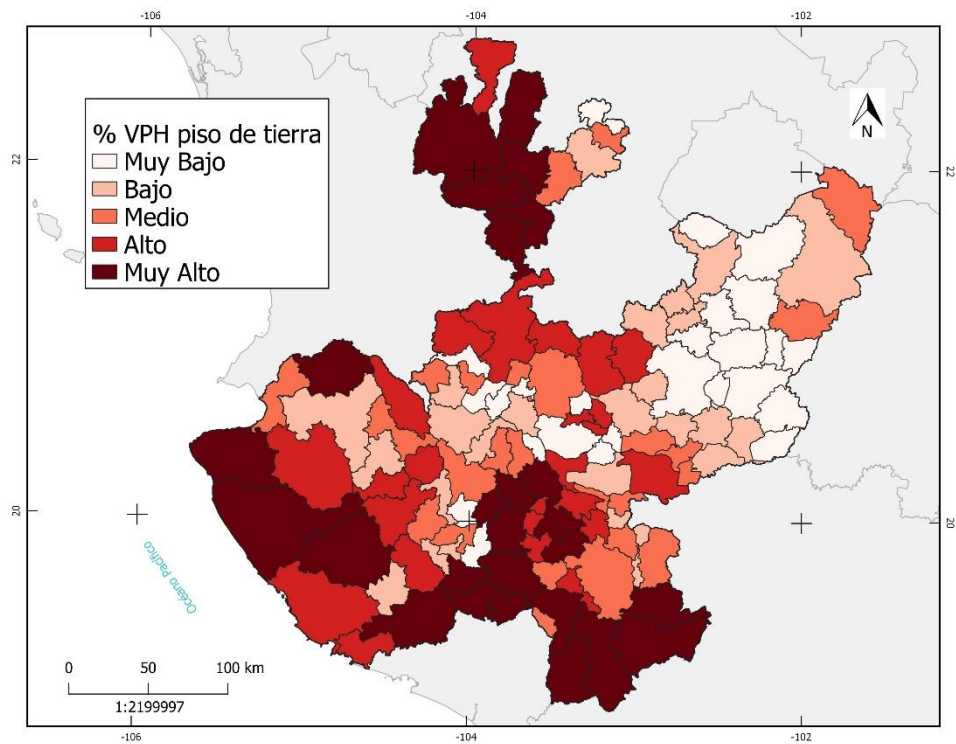


Figura 46: Porcentaje de viviendas particulares habitadas (VPH) con piso de tierra, con respecto al total de cada municipio.

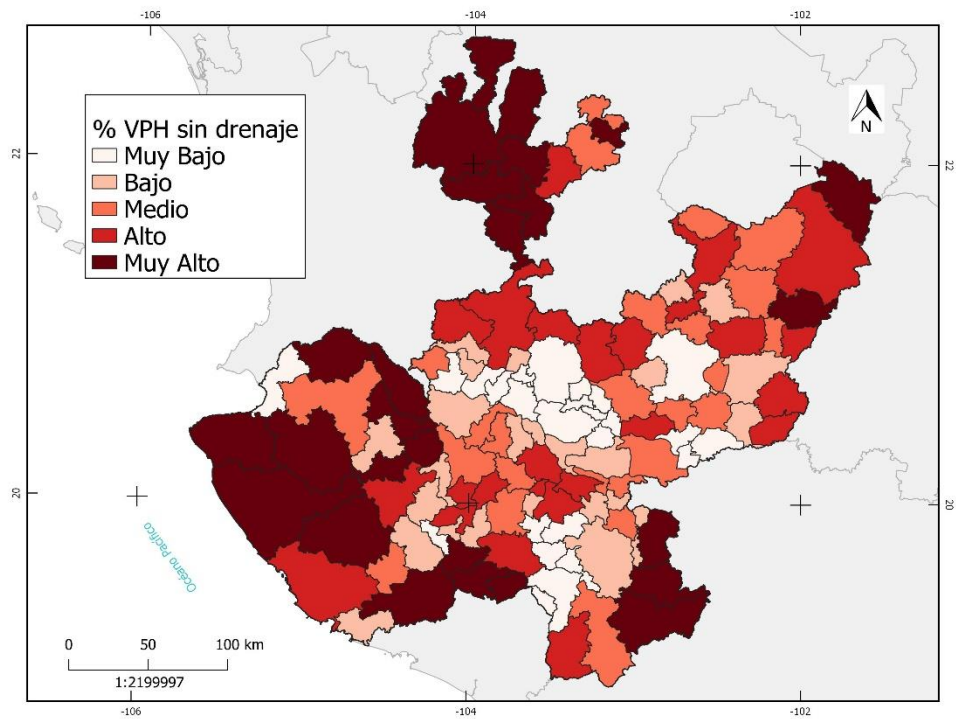


Figura 47: Porcentaje de viviendas particulares habitadas (VPH) sin ningún tipo de drenaje, con respecto al total de cada municipio.

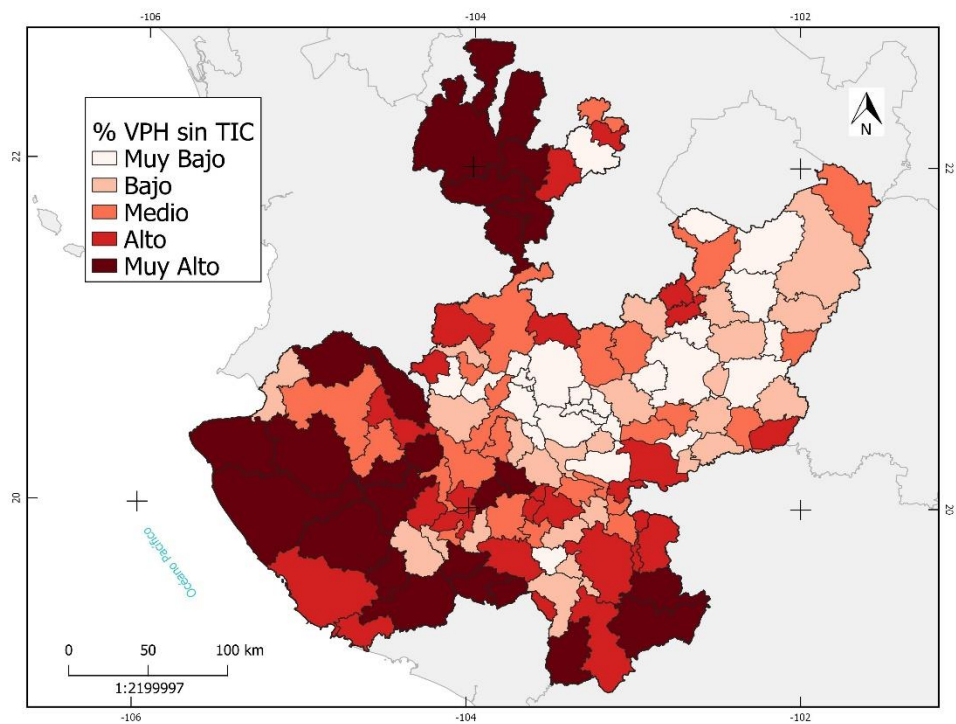


Figura 48: Porcentaje de viviendas particulares habitadas (VPH) sin tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), con respecto al total de cada municipio.

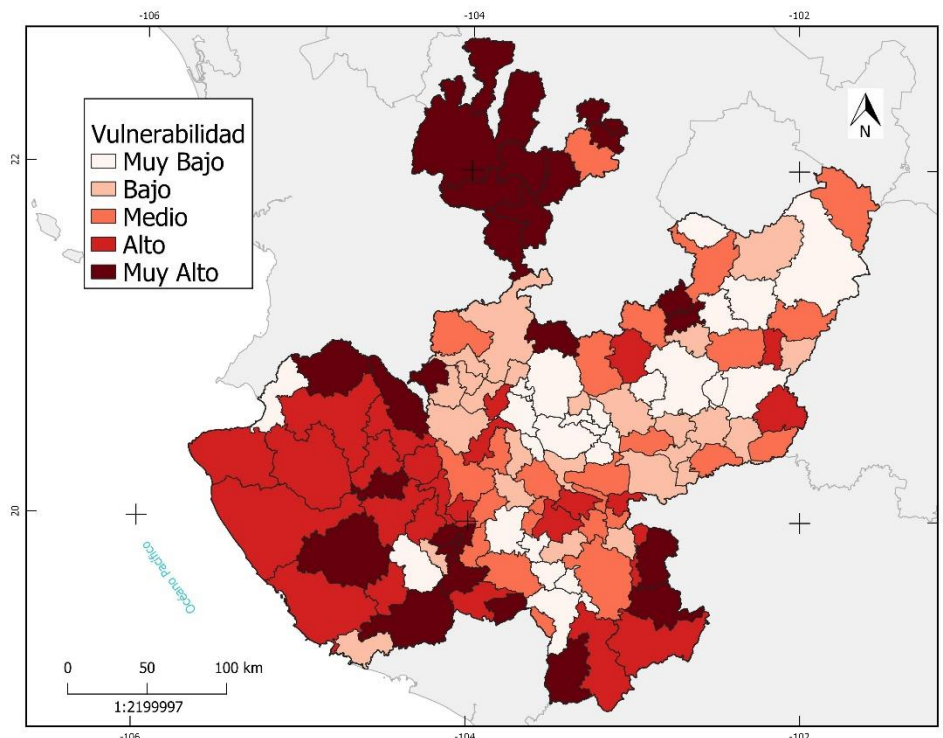


Figura 49: Vulnerabilidad (incluyendo todos los indicadores seleccionados) a las precipitaciones extremas por municipio en el estado de Jalisco.

4.3- Riesgo

Los productos de Peligro, Exposición y Vulnerabilidad obtenidos representan herramientas individuales para los instrumentos de gestión del riesgo. Cada uno de ellos brindan enfoques particulares, con un marco teórico que les confiere fronteras en el conocimiento. El siguiente paso es englobar estos resultados en un análisis de riesgo integrador.

El riesgo asociado al Pr5 (Figura 50) presenta los valores más elevados sobre todo en la región oeste del estado, con valores heterogéneos en el resto del territorio. La tendencia conduce a un riesgo localizado más hacia la porción central jalisciense (incluyendo centro-sur y centro-norte), aunque valores altos también se observan en la zona de los altos y hacia el suroeste (Figura 51).

Esta disparidad en la distribución espacial del riesgo en dependencia del parámetro de peligro que se introduzca en la ecuación conlleva a que cada municipio deba contemplar ambos productos en sus instrumentos de gestión del riesgo, y no solo tomar uno como referencia definitiva.

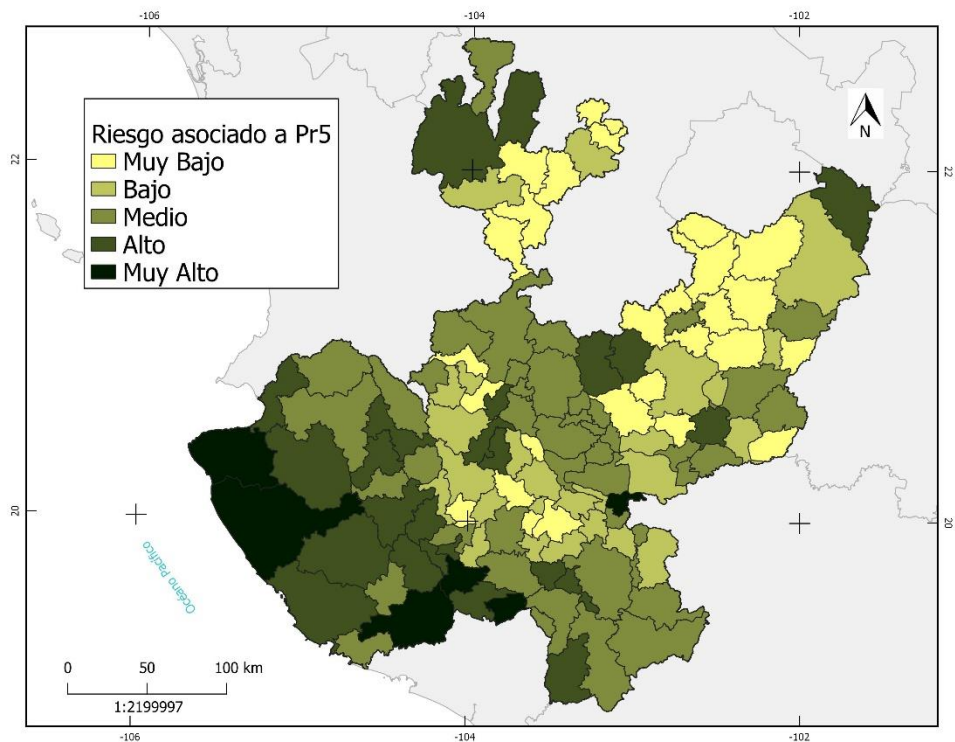


Figura 50: Distribución por municipios del riesgo asociado a las precipitaciones máximas anuales para un período de retorno de cinco años por municipio en Jalisco.

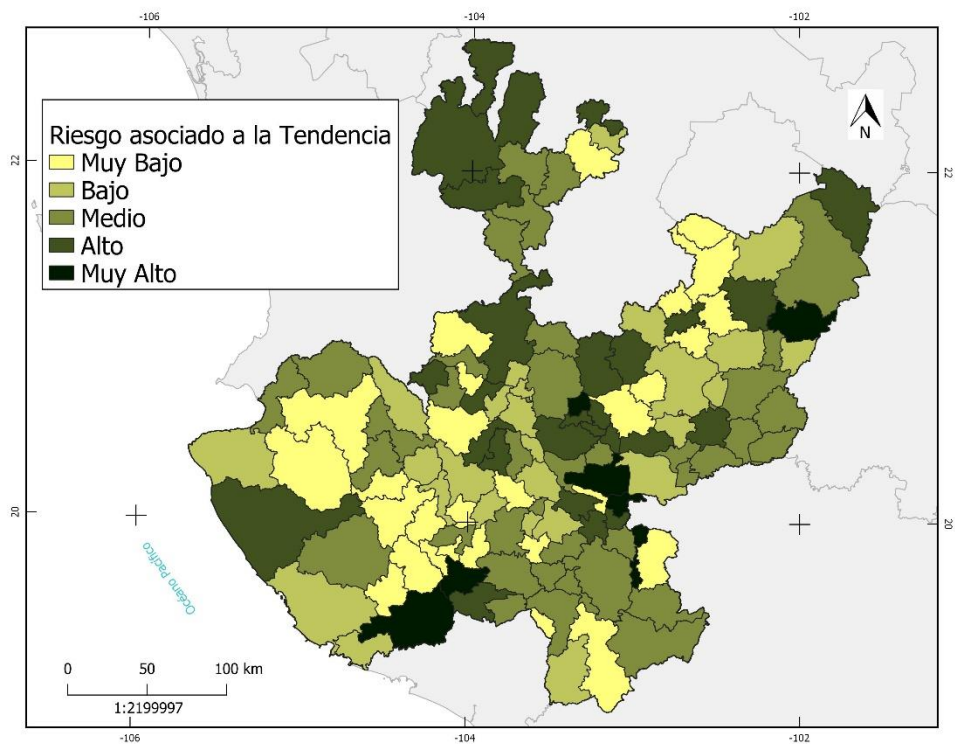


Figura 51: Distribución por municipios del riesgo asociado a la tendencia de las precipitaciones máximas por municipio en Jalisco.

Discusiones

5.1- Debate conceptual

Los análisis de riesgo relacionado con las lluvias parten de una correcta conceptualización del sujeto de estudio. Durante este trabajo se establecieron límites en cada una de las categorías de lluvia, diferenciando así terminologías como “intensa”, “extrema” ó “máximas”. Una precipitación catalogada como extrema puede ser intensa y/o máxima. Sin embargo, el debate recae en la división entre estos dos últimos conceptos, los cuales no tienen las mismas dimensiones y por tanto se derivan conclusiones diferentes de sus respectivos resultados.

La intensidad de una lluvia depende no solo de la magnitud de la misma, sino también de cuestiones físico-geográficas del terreno, así como del tejido social y sus características. De esta manera, el concepto intensidad implica que se involucre en el estudio una manifestación de la misma en el terreno, ya sea una inundación, un deslizamiento de ladera, un cambio en un cauce natural, entre otros fenómenos peligrosos. Este punto de vista contrasta con la gran mayoría de investigaciones citadas en el apartado de Estado del Arte, tales como Ferreira et al. (2017) y Blanchet et al. (2018) en el ámbito internacional, y Sánchez (2011) y Gutiérrez (2011) en el territorio mexicano. En estos estudios se utilizan indistintamente ambas terminologías para referirse al evento extremo de la lluvia, lo que puede crear confusión a la hora de interpretar los resultados.

En conversación en enero del 2022 con los doctores Omar García y Ángel Meulenert, especialistas del Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara, manifestaron que en las mesas de trabajo con las autoridades de Protección Civil y de CONAGUA del estado de Jalisco tampoco se abordan estas diferencias de conceptos y se refleja en los umbrales de lluvia intensa que exponen en sus planes de alerta temprana y mapas de riesgo.

El discurso a nivel académico, científico y de tomadores de decisiones debe involucrar una correcta identificación del tipo de lluvia que se aborda. Así lo sustenta las experiencias recurrentes año tras año, donde acumulados de precipitación que distan de los preestablecidos umbrales de intensidad conducen a fenómenos naturales peligrosos como las comunes

inundaciones en el AMG. La prevención comienza con un discurso claro sobre el riesgo asociado a las lluvias, evitar las ambigüedades con el sujeto de investigación es la antesala que determina el éxito o el fracaso de una alerta temprana.

5.2- Fuentes de datos: Oportunidades y Retos.

El uso adecuado de las bases de datos es otro tema cardinal entre los resultados de la presente investigación. Las estaciones climatológicas convencionales de CONAGUA brindan una base de datos con alta resolución temporal que permite evaluaciones de recurrencia y de tendencia, así como la delimitación de ciclos interanuales. Por el propio principio en las mediciones, representan además una referencia para evaluar productos satelitales de precipitación como es el caso del CHIRPS.

De hecho, los productos satelitales ofrecen una mejora en la resolución espacial, con mallas de datos suficientes para trabajar con escalas locales. En el presente estudio se comprobó la importancia de realizar el análisis exploratorio de estas bases de datos, en específico el caso de CHIRPS, en correspondencia con los resultados obtenidos por Baez et al. (2019) y Fang et al. (2019), con una evaluación estadística sobre los indicadores de lluvias extremas derivados de CHIRPS que se pueden emplear para Jalisco.

Para el caso específico del territorio jalisciense, la base de datos CHIRPS no refleja los extremos de lluvia tal como exponen Funk et al., 2015, artículo que presenta dicha base de datos en un análisis a escala regional planetaria. En el caso de la precipitación máxima anual en 24 horas, la base de datos se aleja mucho de los valores de las estaciones *in situ*. Cabe destacar que los autores de la mencionada investigación aclaran la importancia de estos análisis de eficiencia a escalas más pequeñas. Sin embargo, CHIRPS optimiza su efectividad a medida que aumenta la cantidad de días contenidos en un dato, o sea, péntadas, décadas y acumulados mensuales. Esta tendencia entra en resonancia con las recomendaciones dadas por Perdigón et al. (2017) y Morales et al. (2021) correspondientes a su uso para estudios de sequía meteorológica. Precisamente, el indicador de precipitación máxima anual en cinco días muestra resultados muy consistentes.

La base de datos CHIRPS se convierte en una fuente importante para analizar las lluvias, aunque siempre se debe corroborar su fiabilidad a escalas específicas, sobre todo cuando se

indaga en los máximos de precipitación y el riesgo derivado. Incluso, a nivel estatal en el territorio mexicano, puede haber variación en su efectividad como sucede en Jalisco.

5.3- La estadística y su interpretación

La recurrencia de lluvias máximas y la tendencia de las mismas en los últimos años son productos estadísticos que extrapolan la experiencia previa hacia escenarios futuros. Estos modelos climáticos permiten trazar estrategias a mediano y largo plazo, siempre y cuando su interpretación sea correcta.

En el estado de Jalisco se evidenció una tendencia al aumento de los casos de lluvias máximas en la mayor parte del territorio. Este resultado no necesariamente entra en contradicción con las conclusiones de algunos autores como Esparza, M. (2014) sobre el aumento de los episodios de sequía meteorológica en la zona de estudio. La sequía y las precipitaciones extremas ocurren en escalas temporales diferentes; mientras la primera involucra varios meses, la segunda se centra en acumulados de pocas horas o días. Ambos extremos incluso pueden coexistir en el tiempo. Tal es el caso de un episodio de lluvia máxima en unas pocas horas durante un evento de sequía, donde el agua escurre hacia la red de drenaje de la ciudad y no aportar al manto freático.

Este resultado de la tendencia de precipitaciones máximas guarda relación con teorías de cambio climático como la presentada por Katz y Brown (1992), quienes apuntan a un aumento de los extremos de las variables atmosféricas con solo un pequeño cambio en los climas regionales.

Al analizar los períodos de retorno se deben puntualizar también algunos aspectos. El valor de precipitación para un tiempo determinado, por ejemplo, cinco años, es el acumulado máximo que se espera ocurra al menos una vez en ese lapso de tiempo. Esto no excluye que ocurran valores superiores, por lo que a medida que aumenta la importancia socio-económica del problema tratado, se debe aumentar el período de retorno que se tome. Siempre y cuando este período tenga significancia estadística, o sea, el valor de recurrencia debe estar dentro de la muestra inicial.

Se recomienda que cuando se traten recurrencias de 50 ‘ó 100 años se aclare que los valores de lluvia son extrapolados, y por tanto dicha extrapolación puede estar sujeta a subestimar o

sobreestimar los datos. De acuerdo a los resultados de esta investigación, para recurrencias de este tipo en el estado de Jalisco se debe aplicar correcciones a los valores finales, ya que la tendencia de las precipitaciones máximas indica una posible subestimación de la ecuación de probabilidades. El AMG se convierte en centro de atención, porque los valores cercanos a 100 mm/día para un Pr5 se combinan con el área de tendencia positiva más fuerte en todo el estado.

Las fronteras físicas suelen ser construcciones humanas que responde a una ordenación territorial. En el caso de los fenómenos hidrometeorológicos, la dinámica de la atmósfera conduce a fronteras móviles en los campos de las variables. Por lo que resulta prudente combinar ambos principios y, a través de patrones espaciales de la precipitación máxima, establecer zonas de mayor o menor peligro y adaptar la ordenación territorial a esta realidad espacial. Jalisco puede ser una región propicia para este fin ya que existe una tendencia espacial bien marcada de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas. El agrupar municipios con características similares permite un abordaje más eficiente de la problemática.

Se recomienda que los tomadores de decisiones a nivel municipal vinculados con los instrumentos de gestión del riesgo trabajen en equipo dentro del marco que establecen las fronteras atmosféricas del campo de lluvias extremas. Tal es el caso de las regiones Costa Sur y Costa Sierra Madre Occidental; ambas contienen municipios con diversidad de niveles de exposición y vulnerabilidad, sin embargo, todos se encuentran bajo un mismo patrón de peligro.

La atmósfera, con su ya mencionada dinámica, permite además una teleconexión entre eventos espaciados y sin aparente vínculo entre sí. En la presente investigación se concuerda con Magaña et al. (1998), Méndez et al. (2007) y Cerano et al. (2011) en cuanto a la influencia del fenómeno ENSO en el régimen de precipitaciones en territorio mexicano. En Jalisco se observa una periodicidad homogénea en la ocurrencia de valores extremos que coincide con la frecuencia típica de esta oscilación atmosférica.

A pesar de que las investigaciones han sido sistemáticas con respecto a este evento cíclico, siguen muchas cuestiones por discernir y lejos de tomarlo como paradigma o el llamado “chivo expiatorio”, concebir al ENSO como la causa de muchos eventos peligrosos es una

cuestión que requiere, al igual que los productos satelitales, un estudio previo para cada región. El ENSO es fuente de variabilidad, pero su complejo sistema de interacción océano atmósfera lo convierte en foco de la propia variabilidad climática.

Otros de los resultados de la presente tesis fue la determinación del inicio y fin del temporal, así como de los meses más peligrosos en cuanto a lluvias máximas en cinco días. Este es otro producto sujeto a una variabilidad climática. El inicio del temporal dependerá de muchos factores, y aunque se definieron las fechas promedio, es prudente auxiliarse de los pronósticos estacionales que cada año brinda el IAM. El final del temporal resultó aún más inexacto, así que desactivar protocolos de seguridad antes de tiempo durante el período lluvioso puede conllevar a desastres significativos.

El mensaje común que se deriva de estos resultados es que, debido a su propia realidad estadística, los productos requieren constante actualización, verificación y concatenación entre ellos. Es prudente analizarlos dentro de una realidad social tan dinámica y cambiante como la propia atmósfera, un marco donde lo cuantitativo se factoriza hacia variables cualitativas para sacar conclusiones más realistas, adaptadas a cada territorio, correlacionadas con la exposición y la vulnerabilidad y así aportar a los instrumentos de gestión del riesgo.

5.4- Concatenación teórica del riesgo

La multiplicidad de teorías en torno a las componentes restantes del riesgo representa un valioso aporte para el investigador y a la vez un reto en el poder discernir y enfocarse en la más adecuada para los objetivos de su propio estudio.

La exposición se confina por lo general a aspectos físicos, realidades contables que se convierten en focos de atención al inmiscuirse dentro del rango de acción del peligro. Su independencia de la vulnerabilidad es defendida en esta investigación, en contraparte con estudios referentes en México como el desarrollado por Zúñiga y Magaña (2017) sobre la vulnerabilidad y el riesgo a lluvias intensas en el país. La exposición física puede incluso ir en sentido contrario a la vulnerabilidad en análisis de fenómenos naturales recurrentes en determinado territorio. Así, una sociedad más expuesta puede con el tiempo adquirir experiencias y capacidades cognitivas sobre el peligro que se traduce en una vulnerabilidad menor.

En el intento de abarcar la compleja temática de la vulnerabilidad, la postura de la vulnerabilidad estructural propuesta por Romo (2018) manifestó la heterogeneidad de los municipios jaliscienses. Los resultados representan una aproximación general para la lluvia extrema. Este enfoque, que no necesariamente rompe con las corrientes de la ecología política, adapta la componente de vulnerabilidad al marco de acción del sujeto de estudio, el cual no contempla sus manifestaciones (afectaciones sobre todo hídrico y geomorfológico) y por tanto no se incluyen variables de tipo subjetivo o creativo. A su vez, esta postura es consecuencia del propio debate conceptual de punto de partida, las diferencias en las terminologías de la lluvia. Un estudio que trate la lluvia intensa sí debe ahondar en la vulnerabilidad mixta toda vez que se están contemplando casos concretos de fenómenos peligrosos producidos por la precipitación. Una visión integradora del riesgo invita a estudios interdisciplinarios, donde la teoría, los métodos y técnicas y la realidad del sujeto de investigación vayan en la misma línea.

Conclusiones

El riesgo asociado a eventos naturales, acentuado por el actual cambio climático y sus consecuentes alteraciones en el comportamiento promedio de las variables atmosféricas, conduce a estudios a diferentes escalas como elementos integradores en los instrumentos de gestión y manejo de desastres. En la presente investigación se abordó dicha problemática para el caso de las lluvias extremas en el estado de Jalisco desde una visión integradora, donde se incluyeron análisis de cada uno de los componentes que intervienen en el nivel de riesgo: peligro, exposición y vulnerabilidad.

El marco teórico se trabajó sobre la base de la geografía de los riesgos, clasificando al sujeto de estudio como fuente de riesgo medioambiental. La sociedad por su parte se involucra de manera activa, toda vez que el riesgo parte de un actuar inadecuado del hombre, siendo un problema social de origen natural y de repercusión territorial. El peligro se estudió desde la magnitud y probabilidad de ocurrencia de lluvias extremas con un análisis histórico, heurístico, estadístico y determinístico. La exposición y la vulnerabilidad, de acuerdo con las últimas corrientes de la ecología política, son componentes individuales, donde sus direcciones de influencia no siempre apuntan hacia el mismo sentido.

Un factor clave en la concepción del sujeto de estudio fue establecer los límites del mismo con un debate conceptual sobre la precipitación extrema. Las dimensiones conferidas a la precipitación “máxima” (climatológica) y a la “intensa” (climatológica, natural y social), permiten una mejor aprehensión del fenómeno y evita interpretaciones erradas sobre los resultados.

La metodología empleada se enmarcó en el paradigma de la geografía cuantitativa con un método exploratorio, descriptivo, correlacional, causal y de tendencia. Esta estructura permitió un análisis integrador del riesgo en el estado de Jalisco. Las bases de datos abarcaron una adecuada resolución espacial y temporal para abordar el fenómeno. Se tomaron las estaciones meteorológicas de CONAGUA y el producto satelital CHIRPS para la precipitación, y la cartografía y censo poblacional proporcionado por INEGI para la exposición física y la vulnerabilidad. En cuanto a las herramientas, el procesamiento de los datos se realizó utilizando la paquetería QGIS, ArcGIS, MATLAB y Microsoft Excel, que a

partir de las cuales se construyeron los gráficos, mapas, análisis estadísticos y tabulados que se presentan en el documento.

El período de estudio de 1981 a 2018 resultó ser óptimo. Cumple con el criterio de tiempo para un análisis climatológico y además permite tener una aceptable resolución espacial de los datos provenientes de estaciones climatológicas convencionales. Se debe tener precaución en el uso de productos satelitales sobre todo con indicativos de precipitaciones extremas. La base CHIRPS no refleja correctamente acumulados extraordinarios de lluvia en 24 horas ni tampoco secuencias de días con lluvia. De esta manera se descarta para investigaciones importantes como el cálculo de recurrencia de estas variables. Sin embargo, sí se recomienda su uso para trabajar con acumulados en períodos de tiempo más largo (cinco días o más), así como la dispersión anual de la lluvia, sobre todo para las porciones central y oriental del estado de Jalisco.

Las estaciones climatológicas se mantienen como una opción válida para acumulados en un día, con las técnicas de interpolación como un recurso necesario que requiere ajustes particulares para cada caso, en busca de disminuir el error en las estimaciones. En Jalisco existe un patrón zonal bien marcado con respecto a los máximos anuales en 24 horas, con valores más elevados en el sudeste del estado y menores hacia el nordeste, lo que guarda relación con el tránsito de fenómenos meteorológicos generadores de lluvia por las costas del estado.

Estos acumulados fuera de la norma están sujetos a una variabilidad climática que se debe tener en cuenta con independencia de si se aborda o no la cuestión del cambio climático. Las oscilaciones atmosféricas de gran escala ENOS y MJO modulan estos valores, por lo que deben introducirse en los pronósticos desde largo hasta corto plazo.

Se corroboró la estacionalidad de las lluvias en el territorio tapatío, con un formato unimodal que varía en dependencia de la región del estado. De tal manera que el análisis de inicio del temporal de cada año no debe asumirse de manera homogénea en todo el territorio, lo que pudiera provocar errores significativos en planificaciones socio-económicas como la agricultura. El inicio y fin del temporal comienza primero hacia el nordeste, a finales de mayo e inicios de junio y ambas fechas se van retardando en dirección de las zonas costeras. Además, el mayor acumulado en un día se restringe al trimestre junio, julio y agosto, sujeto

también a un patrón espacial. Estos resultados vienen aparejados con variaciones interanuales que igualmente se deben involucrar en la toma de decisiones relacionadas con el tema.

La exposición y la vulnerabilidad en el estado de Jalisco son heterogéneas, con distribuciones espaciales por municipio que van a depender del indicador de peligro que se tome como referencia. Si se aborda el riesgo de precipitaciones extremas, a diferencia del riesgo relacionado con los efectos particulares de dicho fenómeno, díganse inundaciones o deslizamientos de laderas, es importante que las conclusiones referidas a los componentes de exposición y vulnerabilidad se ajusten a cada indicador de esta variable atmosférica. En dicho apartado se corroboró el precepto teórico que desliga la exposición de la vulnerabilidad, siempre y cuando se definan ambas componentes como en esta tesis.

Por último, la combinación de las tres componentes reveló mapas de riesgo asociado a las lluvias máximas. El conjunto de resultados de la presente investigación representa una herramienta para mitigar el riesgo potencial ya que se logró aportar conocimiento sobre la compleja interacción del fenómeno de precipitación con la población en el estado de Jalisco, estableciendo un marco teórico y una metodología acordes con este problema social, de origen natural y de repercusión territorial variable a escala municipal.

Recomendaciones

El análisis del riesgo ante un evento natural es un asunto que debe permanecer abierto, con constantes actualizaciones en busca de productos cada vez más finos y útiles. De las conclusiones de este trabajo se derivan una serie de recomendaciones para futuros estudios en esta línea del conocimiento:

- Introducir en el análisis del peligro modelos climáticos para visualizar escenarios futuros.
- Realizar análisis de lluvias intensas, estableciendo umbrales a nivel local y tomando en cuenta para su clasificación los efectos que provoca.
- Ampliar el espectro de la vulnerabilidad con la integración de variables sociales y así lograr un análisis sistémico de la misma.
- Incorporar a la agricultura en los parámetros de exposición y vulnerabilidad.
- Además, se recomienda tomar en cuenta los otros indicadores de peligro que se abordaron.

Referencias

1. Agilan, V. & Umamahesh, N. (2018). El Niño Southern Oscillation cycle indicator for modeling extreme rainfall intensity over India. *Ecological Indicators*, 84, 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.012>.
2. Aristizábal, E. & Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. *Dyna*, 73, 5-16.
3. Ayala, F. & Olcina, J. (2002). *Riesgos naturales*. Editorial Ariel, ISBN:8434480344.
4. Baez, O., Zambrano, M., Ribbe, L., Nauditt, A., Giraldo, J., Xuan, N. (2019). Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America. *Atmospheric Research*, 213: 34-50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.011>
5. Barrantes, G. & Márquez, R. (2011). De la atención del desastre a la gestión del riesgo; una visión desde la geografía. *Revista Geográfica de América Central*, 47, 15-38.
6. Beguería, S. & Lorente, A. (1999). Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el pirineo aragonés occidental. *Geographica*, 37, 1-15.
7. Blanchet, J., Molinié, G. & Touati, J. (2018). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate Dynamics*, 51, 799–812. [Doi:10.1007/s00382-016-3122-7](https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7).
8. Boyard-Micheau, J., P. Camberlin, N. Philippon, and V. Moron (2013), Regional-scale rainy season onset detection: A new approach based on multivariate analysis, *J. Clim.*, 26(22), 8916–8928.
9. Buzai, G. & León, A. (2015). Balance y actualidad de la Geografía Cuantitativa. *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones*, 31-54, ISBN: 978-956-9539-01-5.
10. Campos, D. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Ingeniería Hidráulica en México*, 3, 45-66.
11. Carter, M. & Elsner, J. (1996). Convective rainfall regions of Puerto Rico. *International Journal of Climatology*, 16, 1033-1043.
12. Cardona, O. (2001). Estimación Holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis para optar por el grado de Doctorado en Ingeniería

- Sísmica. Universidad politécnica de Cataluña, España. p. 232.
<http://www.tdx.cat/TDX-0416102-075520>.
13. Carvalho, L., Jones, Ch. and Liebmann, B. (2004). The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, 17, 88-108.
 14. CENAPRED (2004): Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Serie Atlas Nacional de Riesgos. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
 15. Cerano, J., Villanueva, J., Valdez, R., Arreola, J. & Constante, V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17, 207-215.
<https://Dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.076>.
 16. Charles, J. (2000). Occurrence of Extreme Precipitation Events in California and Relationships with the Madden–Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 13, 3576 – 3587.
 17. Coburn, A., Spence, R. & Pomonis, A. (1991). Vulnerability and Risk Assessment. UNDP Disaster Management Training Program.
 18. Cuevas (2011). Climate change, vulnerability, and risk linkages. *International Journal of Climate*, 3, 29-60. [Doi 10.1108/17568691111107934](https://doi.org/10.1108/17568691111107934).
 19. Dao, H. & Peduzzi, P. (2003). Global risk and vulnerability index trends per year (GRAVITY), phase IV: annex to WVR and multi risk integration. A Technical Report for United Nations Development Programme Bureau of Crisis Prevention & Recovery, UNDP/BCPR, Geneva.
 20. Diaconescu, E. P., P. Gachon, J. Scinocca, and R. Laprise (2015), Evaluation of daily precipitation statistics and monsoon onset/retreat over western Sahel in multiple data sets, *Clim. Dyn.*, 45(5–6), 1325–1354.
 21. Díaz, G., Sánchez, I., Quiroz, R., Garatuza, J., Watts, C., Cruz, I. & Guajardo, R. (2011). Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, II, 4, 51-64.

22. Dixon, R. & Moore, T. (2011). Tornado vulnerability in Texas. *Weather, Climate, and Society*, 4, 59-58.
23. Duarte, C., Marbá, N. & Holmer, M. (2007). Rapid Domestication of Marine Species. *Science*, 316, 382-394.
24. Dunning C., Black, E. & Allan, R. (2016). The onset and cessation of seasonal rainfall over Africa. *J. Geophys. Res.*, 121, 11405–24.
25. Engels, F. (1970). *Antiduhring*, La Habana, Cuba, Editorial Pueblo y Educación.
26. Engels, F., (1982), *Dialéctica de la Naturaleza*, La Habana, Cuba, Editorial de Ciencias Sociales.
27. Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, 89, 195-218.
28. Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A., Zhao, L. (2019). Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric research*, 223: 24-38.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.001>
29. Fauchereau, N., Trzaska, S., Roualt, M. & Richard, Y. (2003). Rainfall variability and changes in southern Africa during the 20th century in the global warming context. *Natural Hazards*, 29, 139-154.
30. Feloni, E., Nastos, P. & Matsangouras, I. (2017). Seasonal Synoptic Characteristics of Heavy Rain Events in the Attica Region. *Perspectives on Atmospheric Sciences*. Springer Atmospheric Sciences. Springer, Cham, 391-396, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-35095-0_55.
31. Ferreira, A., Friederichs, P., De Haan, L., Neves, C. & Schlather, M. (2017). Estimating space-time trend and dependence of heavy rainfall.
32. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1): 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
33. García, E. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 50, 171-191.

34. García, J., Bequería, S. & Lorente, A. (1999): “Eventos hidrológicos de baja frecuencia en el Pirineo central español y sus efectos geomorfológicos”. Serie Geográfica, 9, 163-176. ISSN: 1136-6277.
35. Ghelani, R., Oliver, E., Holbrook, N., Wheeler, M. & Klotzbach, P. (2017). Joint modulation of intraseasonal rainfall in tropical Australia by the Madden-Julian Oscillation and El Niño-Southern Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 44, 10,754 - 10,761. <https://doi.org/10.1002/2017GL075452>.
36. González, M. (2014): Lluvia intensa en el período poco lluvioso desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo. Tesis de Licenciatura.
37. Griffiths, G., Salinger, M. & Leleu, I. (2003). Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific convergence zone. *International Journal of Climatology*, 23, 847-869.
38. Groisman, P., Knight, R. & Karl, T. (2001). Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: trends in the twentieth century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 219-246.
39. Gumbel, E. (1941). The return period of flood flows. *Annals of Mathematical Statistics*, 12, 2, 163-190.
40. Gutiérrez, J., Vargas, V., Romero, M., Plácido de la Cruz, J., Aguirre, M. & Silva, H. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones geográficas*, 76, 20-33. Recuperado en 23 de enero de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000300003&lng=es&tlng=es.
41. Haylock, M. and N. Nicholls (2000), “Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910–1998”, *International Journal of Climatology*, 20, 1533-1541.
42. Haylock, M. R., Peterson, T., Abreu de Sousa, J. R., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. & Baez, J. (2005). Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 29, 1490-1512.
43. Houssos, E. & Bartzokas, A. (2006). Extreme precipitations events in NW Greece, *Adv. Geosci.*, 7, 91–96, <http://www.adv-geosci.net/7/91/2006/>.

44. Jáuregui, E. (2001). Las precipitaciones extremas en la Cd. de México. El tiempo del clima. Valencia: Asociación Española de Climatología, 2001, 325-334. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9220>.
45. Jenkins, G. & Watts, D. (1968). Spectral Analysis and its Applications. San Francisco: Holden-Day.
46. Jiang, Z., Tai-Jen Chen, G. & Wu, M. (2003). Large-Scale Circulation Patterns Associated with Heavy Spring Rain Events over Taiwan in Strong ENSO and Non-ENSO Years. Monthly Weather Review, 131, 1769–1782. <https://doi.org/10.1175//2561.1>.
47. Jones, Ch., Waliser, D., Lau, K. & Stern, W. (2004). Global Occurrences of Extreme Precipitation and the Madden–Julian Oscillation: Observations and Predictability. Journal of Climate, 17, 4575 – 4589.
48. Jung, Il., Bae, D. & Kim, G. (2011). Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. International Journal of Climatology, 31, 359 - 370. Doi: [10.1002/joc.2068](https://doi.org/10.1002/joc.2068).
49. Karl, T. & Knight, R. (1998). Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. Boletín American Meteor Society, 79, 231–241.
50. Katz, R. W., and B. G. Brown, 1992: Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. Climatic Change, 21, 289–302
51. Konstantinov, F. (1984). Fundamentos de la Filosofía Marxista Leninista: Materialismo Dialéctico, La Habana, Cuba, Editorial Pueblo y Educación.
52. Koshiasvilli, B. (1972). Las lluvias torrenciales en Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, Cuba.
53. Kunkel, K. (2003). North American Trends in Extreme Precipitation. Natural Hazards 29, 291–305. doi:10.1023/A:1023694115864.
54. Lana, A., Campins, J., Genovés, A. & Jansá, A. (2007). Atmospheric patterns for heavy rain events in the Balearic Islands, Adv. Geosci., 12, 27–32, 2007, <http://www.adv-geosci.net/12/27/2007/>.
55. Liebmann, B., Jones, C. & Carvalho, L. (2001). Interannual variability of extreme precipitation events in the state of Sao Paulo, Brazil. Journal of Climate, 14, 208–218.

56. Liebmann, B., I. Bladé, G. N. Kiladis, L. M. Carvalho, G. B. Senay, D. Allured, S. Leroux, and C. Funk (2012), Seasonality of African precipitation from 1996 to 2009, *J. Clim.*, 25(12), 4304–4322.
57. Linsley, R., Kohler, M. & Paulhus, J. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Capítulo 3: Precipitación, páginas 45-88 y Capítulo 11: Probabilidad en hidrología: Una base para diseño, pág. 281-310. Segunda edición. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S. A.
58. Lobo, D., Gabriels, D., Ovalles, F., Santibañez, F., Moyano, M., Aguilera, R., Pizarro, R.; Sangüesa, C. & Urra, N. (2006). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. CAZALAC, Documentos Técnicos, Montevideo: PHI-UNESCO.
59. Madden, R. & Julian, P. (1971). Detection of 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 702-708.
60. Maderey, L. (1980). Intensidad de la precipitación en el Valle de México. *Investigaciones geográficas*, 10, 325-334. ISSN: 0188-4611.
61. Magaña, V., Pérez, J. & Conde, C. (1998). El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México. *Ciencias*, 51, 14-18.
62. Magaña, V., Vázquez, J., Pérez, J. & Pérez, J. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42. 313 – 330.
63. Marengo, J. A., Liebmann, B., Kousky, V., Filizola, N. & Wainer, I. (2001). Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. *J. Climate*, 14, 833–852.
64. Marco, V., Estrela, M. & Miró, J. (2018). Precipitación intensa en la región de Murcia. Distribución espacial y relación con la circulación sinóptica (1980-2000). *Agencia Estatal de Meteorología*, 2018, p. 103-113.
65. Martínez, C., Campins, J., Jansá, A. & Genovés, A. (2008). Heavy rain events in the Western Mediterranean: an atmospheric pattern classification. *Advances in Science and Research*, 2, 61-64.
66. McKee, T., Doesken, N. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. *Memories of Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorology Society, Anaheim, California, 179-186.

67. Méndez, J., Návar, J., González, H. & Garza, E. (2007). Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Ciencia UANL*, 10, 290-298.
68. Monjo, R. (2010). El índice n de la precipitación intensa. <https://www.researchgate.net/publication/268417628>. Visto 12/01/2020.
69. Morales, M., Herrera, G. del S., Aparicio, J., Rafieeiniasab, A., Lobato, R. (2021). Evaluating reanalysis and satellite-based precipitation at regional scale: A case study in southern Mexico. *Atmósfera*, 34(2): 189-206. <https://doi.org/10.20937/ATM.52789>
70. Nuñez, M. & Vargas, W. (1998). El niño 1997-1998: un factor económico y social. *Boletín Informativo Techint*, 295.
71. Oguntunde, P., Friesen, J., Wan de Giesen, N. & Savenije, H. (2006). Hydroclimatology of the Volta river basin in West Africa: Trends and variability from 1901 to 2002. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 1180-1188.
72. Orbe, G. & Barcia, S. (2007). Patrones sinópticos que generan “días con lluvias localmente intensas” en la mitad occidental de Cuba. *Distribución temporal y espacial de las mismas. Memorias IV Congreso Cubano de Meteorología*, Ciudad de La Habana, 4-8 diciembre 2007. 13 pp.
73. Pardo, M. (2007). El impacto social del Cambio Climático. *Panorama Social*, 5, 22-35.
74. Pedersen, L., Jensen, N., Christiansen, L. & Madsen, H. (2010). Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, 95(4), 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.11.007>.
75. Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Pérez, P.O., Barrett, B.S. (2018). The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *International Journal of Climatology*, 38(5): 2174-2186. <https://doi.org/10.1002/joc.5322>
76. Pérez, H. (2015). Configuraciones sinópticas generadoras de lluvia intensa en el período lluvioso en la mitad oriental de Cuba. Tesis de Licenciatura.
77. Planos, E. (1999). Características hidrológicas de las grandes precipitaciones en las regiones Occidental y Central. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

78. Planos, E. (2000). Características hidrológicas de las grandes precipitaciones: subregión Camagüey - Maniabón y Región Oriental. PCTN: Cambios Climáticos y Evolución del Medio Ambiente Cubano, Proyecto: Variabilidad del Escurrimiento, Instituto de Meteorología, La Habana.
79. Planos, E. (2011). Distribución espacial y temporal de las grandes precipitaciones en Cuba.
80. Planos, E., Limia, M. & Vega, R. (2004). Intensidad de las precipitaciones en Cuba. Resultado Científico. Programa Ramal: “Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial”, 80-88.
81. Pourasghar, F., Oliver, E. & Holbrook, N. (2019). Modulation of wet-season rainfall over Iran by the Madden–Julian Oscillation, Indian Ocean Dipole and El Niño–Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 39, 4029 - 4040. <https://doi.org/10.1002/joc.6057>.
82. Ramos, I., Guerrero, S. & Huerta, F. (2007). Patrones de distribución geográfica de los mamíferos de Jalisco, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 78(1), 175-189.
83. Riazanov, V. (1975). Curvas de acrecentamiento de las precipitaciones de mayor intensidad durante el período seco del año. Grupo Hidráulico Nacional, DAP, La Habana, Cuba.
84. Robledo, F. & Penalba, O. (2009). Análisis estacional de la frecuencia diaria y la intensidad de los extremos de precipitación sobre el sudeste de Sudamérica. *Meteorológica*, 32 y 33, 31-49.
85. Romanazzi, P. (2014). Aproximación a la estimación estadística de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras (Santa Fe, 2014). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/40966>.
86. Roy, S. & Balling, R. (2004). Trends in extreme daily precipitation indices in India. *International Journal of Climatology*, 24, 457-466. doi: 10.1002/joc.995.
87. Sánchez, D. (2011). Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México. *Cuadernos Geográficos*, 48, 135-159.

88. Simon, A. & Mohankumar, K. (2004). Spatial variability and rainfall characteristics of Kerala. *Earth Planet. Sci.*, 113 (2), 211-221.
89. Soldano, A. (2009). Conceptos sobre riesgo. Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la RIMD creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción del Riesgo por Inundaciones, Córdoba, Argentina.
90. Strahler, A. (1994). *Geografía Física*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona. ISBN: 9788428208475.
91. Tinoco, J., Gómez, J. & Monterroso, A. (2011). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 161-168.
92. Trusov, I. (1965). *Las Precipitaciones en la Isla de Cuba*. Edit. INRH A.C.C, La Habana.
93. Zhang, X., Hogg, W. & Mekis, É. (2001). Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Precipitation Events Over Canada. *Journal of Climate*, 14. 1923-1936. 10.1175/1520-0442(2001)014<1923:SATCOH>2.0.CO;2.
94. Zwiers, F., & Kharin, V. (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. *Journal of Climate*, 11, 2200–2222.