

Riesgo asociado a eventos de precipitaciones intensas en el Gran Mendoza, Argentina

Risk associated with intense precipitation events in the Gran Mendoza Area, Argentina

Marianetti, Georgina^{1,2}; Rivera, Juan Antonio^{1,2}

¹Universidad Juan Agustín Maza. Mendoza. Argentina.

²Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales Técnicas. IANIGLA-CONICET, Argentina.

Contacto: gmarianetti@mendoza-conicet.gob.ar
Autor de correspondencia: Marianetti, Georgina

Palabras claves: riesgo, precipitaciones intensas, Gran Mendoza, vulnerabilidad social, amenaza

Key words: risk, intense precipitation, Gran Mendoza, social vulnerability, hazard

Resumen

La ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas suele generar impactos negativos a nivel socio-económico, en particular en regiones semi-áridas que no suelen estar preparadas para enfrentar este tipo de fenómenos. El área metropolitana del Gran Mendoza no es la excepción, siendo afectada por tormentas convectivas durante los meses cálidos que ocurren cada vez más frecuentemente y con mayor severidad. A partir de esta problemática, el objetivo de este trabajo es la creación de un mapa de riesgo asociado a eventos de precipitaciones intensas en el Gran Mendoza. Para ello se utilizaron estimaciones de precipitación del producto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*, indicadores sociales y económicos de organismos nacionales, y datos de impactos sociales y económicos obtenidos de portales periodísticos. El riesgo se derivó de la interacción de la amenaza de eventos de precipitaciones intensas junto con la vulnerabilidad de los sistemas humanos. Para el cálculo de la amenaza se tuvo en cuenta la frecuencia de eventos que superaron los umbrales seleccionados de acuerdo a los impactos sociales y económicos ocasionados. La vulnerabilidad se cuantificó por medio del cálculo del Índice de Vulnerabilidad Social (IVS), que combina diferentes indicadores sociales y económicos a nivel departamental. Los resultados obtenidos indican que los departamentos que presentan un mayor riesgo son Guaymallén y Maipú, mientras que Las Heras y Luján de Cuyo presentan un nivel de riesgo medio y, Capital y Godoy Cruz un nivel de riesgo bajo.

Abstract

The occurrence of intense rainfall events usually generates negative socio-economic impacts, particularly in semi-arid regions that usually are not prepared to face this kind of phenomena. The metropolitan area of Gran Mendoza is no exception, being affected by convective storms during the warm months that occur more frequently and with greater severity. Based on this issue, the objective of this work is the creation of a risk map associated with intense rainfall events in Gran Mendoza. For this purpose, we used precipitation estimations from the Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with Station data product, social and economic indicators from national agencies, and data of social and economic impacts obtained from local media reports. The risk was derived from the interaction between the hazard of intense precipitation events and the vulnerability of human systems. The hazard was calculated considering the frequency of events that exceeded the selected thresholds according to the social and economic impacts caused. The vulnerability was quantified by calculating the Social Vulnerability Index (SVI), which combines different social and economic indicators at departmental level. The results obtained indicate that the departments with the highest risk are Guaymallén and Maipú, while Las Heras and Luján de Cuyo have a medium risk level and Capital and Godoy Cruz have a low risk level.

Artículo completo

Ciencias Ambientales, Agroindustrias y de la Tierra

Introducción

En las últimas décadas se ha intensificado el riesgo asociado a peligros naturales en gran parte de Latinoamérica¹. Esto ha sido debido en parte al calentamiento global asociado a ciertas actividades humanas responsables del incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero, y de procesos de cambio en el uso de suelo, entre otras. El riesgo en el contexto de los cambios climáticos regionales producto del calentamiento global es la potencialidad de que se produzcan daños debido a una amenaza o peligro en los aspectos sociales, económicos, culturales y ambientales de los sistemas humanos².

Uno de los peligros naturales que afecta a diferentes regiones es la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, debido a los graves impactos negativos que generan. Esto es porque poseen una baja probabilidad de ocurrencia, y en general la población no se encuentra preparada para enfrentarlos^{2,3,4}. A causa del incremento en la temperatura global, algunos de estos eventos han aumentado en frecuencia, magnitud, extensión espacial y temporal^{5,6}. Uno de los fenómenos que ha experimentado mayores cambios es la ocurrencia de precipitaciones extremas^{7,3}. El incremento en la temperatura genera un incremento en la evaporación y en el contenido de vapor de agua disponible, lo cual gracias a los mecanismos dinámicos de la atmósfera se traduce en mayores precipitaciones aunque con un patrón espacial heterogéneo⁸. Las regiones que son más susceptibles a la ocurrencia de eventos de precipitaciones extremas se pueden determinar mediante una estimación del riesgo. Su representación a través de mapas constituye un aporte fundamental no sólo para el conocimiento de su variabilidad espacial sino para el desarrollo de medidas de mitigación frente a los impactos causados por los eventos climáticos extremos⁹. Estos mapas se logran a partir de considerar el producto de la vulnerabilidad, que constituye el grado de susceptibilidad frente a efectos adversos por una región, sector o grupo social; y la amenaza, que es la probabilidad de que un evento ocurra en un espacio, tiempo e intensidad determinada como para producir daños¹⁰.

Diversos estudios han cuantificado la amenaza y la vulnerabilidad frente a la ocurrencia de precipitaciones extremas, en particular desde un enfoque local. Por ejemplo, Garnica Peña y Alcántara Ayala¹¹ realizaron un mapa de las zonas susceptibles a inundaciones a causa de fuertes precipitaciones en Veracruz, México. Plaza *et al.*¹² analizaron las variaciones espacio-temporales de las precipitaciones del noroeste de Argentina, cuantificando la vulnerabilidad regional frente a eventos extremos en el noreste de la provincia de Salta. Asimismo, Othmer *et al.*¹³ evaluaron la vulnerabilidad y la amenaza por inundaciones asociadas a fuertes lluvias en la ciudad alemana de Olfen. Otros estudios que cuantificaron el riesgo frente a precipitaciones intensas son el realizado por Zúñiga y Magaña¹⁴ para México, y el de Vorosmarty *et al.*¹⁵ considerando América del Sur.

Particularmente en la Provincia de Mendoza, Argentina, las precipitaciones extremas producen diversos impactos negativos, como por ejemplo caída de ramas y árboles, anegamiento de viviendas, inundaciones, daños en las infraestructuras, colapso de cloacas, cortes de electricidad y agua, e incluso pérdidas de vidas. El Gran Mendoza corresponde al área metropolitana que concentra la mayor densidad de población de la provincia. Como consecuencia de estos eventos meteorológicos, la zona oeste del Gran Mendoza, lindante con el piedemonte, es susceptible a la ocurrencia de procesos aluvionales, mientras que la zona mayoritariamente urbana es propensa a registrar inundaciones repentinas^{16,17}. Cisneros *et al.*¹⁸ resaltan que el avance descontrolado de la urbanización ha llevado a un continuo crecimiento del riesgo geológico asociado a eventos de precipitación.

A pesar del elevado impacto de los eventos extremos de precipitación, existen escasos estudios en la región sobre los mismos, así como también estudios que aborden la vulnerabilidad frente a estos fenómenos. Relacionado a las precipitaciones extremas, Simonelli *et al.*¹⁹ estudiaron las características dinámicas del evento de precipitaciones registrado el 1 de enero de 2000, el cual originó importantes consecuencias negativas en la ciudad de Mendoza. Cisneros *et al.*¹⁸ identificaron zonas en peligro hidrológico en el piedemonte precordillerano de la Ciudad de Mendoza. Con respecto a la vulnerabilidad se destacan los trabajos de Mesa y Giuso²⁰, quienes identificaron procesos sociales y ambientales que incrementan la vulnerabilidad en el área del piedemonte; Vich *et al.*¹⁷, los cuales desarrollaron propuestas para reducir el riesgo por inundaciones repentinas en el Gran Mendoza; y Vich *et al.*²¹, quienes realizaron un estudio morfométrico del piedemonte como una posible herramienta que permita mitigar los daños por inundaciones que se producen en el Gran Mendoza.

En regiones semi-áridas como el Gran Mendoza, la caracterización de eventos extremos de precipitación en escala diaria posee limitaciones metodológicas, en particular para su identificación a partir de percentiles de la función de densidad de probabilidad observada, el cual es el método más utilizado en la literatura científica. Con lo cual, como alternativa de análisis frente a esta problemática suelen considerarse los eventos de precipitaciones intensas, siendo estos definidos a partir de umbrales subjetivos. Por ejemplo, el Equipo de Expertos sobre Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés) determinó dos indicadores de precipitaciones intensas a partir de los índices R10mm y R20mm, que corresponden a los días en los que la precipitación excede los 10 y 20 mm, respectivamente²². Estos indicadores se han empleado para la caracterización de precipitaciones intensas en diversas regiones semi-áridas del mundo^{23,24,25}, por lo tanto, umbrales de precipitación de valores similares podrían ser indicadores de la ocurrencia de impactos socio-económicos en la provincia de Mendoza.

En función de lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo es estimar el riesgo frente a la ocurrencia de precipitaciones intensas en el Gran Mendoza, considerando registros de precipitación de los últimos 35 años e indicadores sociales disponibles a partir de los últimos censos nacionales y provinciales. Para el cálculo del riesgo se combinarán las variabilidades espaciales de la amenaza y la vulnerabilidad asociada a estos fenómenos, las cuales serán estimadas mediante la categorización de eventos de precipitación y la elaboración de un índice de vulnerabilidad social, respectivamente. Esto será de utilidad para la creación de planes de mitigación y prevención frente a estos fenómenos climáticos, y brindará una mejora en el conocimiento en una temática poco analizada desde el punto de vista científico en la región.

Materiales y métodos

a) Área de estudio

La región de estudio corresponde al Gran Mendoza (Figura 1), la aglomeración urbana más importante de la Provincia de Mendoza y del centro-oeste de Argentina. La misma se encuentra conformada por los departamentos de Las Heras, Ciudad de Mendoza, Godoy Cruz, Luján de Cuyo, Guaymallén y Maipú. Los departamentos tienen una población total de 1.086.633 habitantes, de los cuales el 80,67% se concentra en la urbanización (INDEC 2010, DEIE 2010). Hacia el oeste la región limita con el piedemonte, el cual posee una altura entre 800 y 3500 msnm y es una zona de transición entre la Cordillera Frontal y el llano²⁶. El clima en el Gran Mendoza es árido a semiárido²⁷, con una concentración de las precipitaciones en los meses cálidos²⁸, las cuales en caso de registrarse en forma de eventos intensos o extremos son el principal desencadenante de las inundaciones que se producen en la región.

b) Datos

Se utilizaron datos de precipitación diaria estimada a partir del producto satelital *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) en 15 puntos de retícula ubicados a lo largo del área de estudio (Figura 1). Los datos fueron obtenidos del portal de *Climate Hazard Center* de la Universidad de California en Santa Bárbara²⁹. La base de datos CHIRPS tiene una resolución espacial de 0.05° x 0.05° y cobertura casi-global en distintos períodos de acumulación³⁰. Investigaciones previas indican que el producto CHIRPS representa adecuadamente las características espacio-temporales de las precipitaciones en la región de Cuyo^{31,32}, lo cual lo hace adecuado para el análisis propuesto. En particular, se utilizaron datos del período 1986-2018 para los meses de octubre a abril, dado que son los que presentan una mayor cantidad de eventos de lluvia de alta intensidad que producen daños sociales y económicos, coincidiendo con otros autores^{17,18}.

Para el cálculo de la vulnerabilidad se utilizaron indicadores relacionados al tipo de hogar, población total, calidad constructiva, necesidades básicas insatisfechas, problemas con el suministro de agua y condiciones climáticas y educación. Los mismos fueron obtenidos a partir de censos realizados en el año 2010 por el organismo Instituto Nacional de Estadística y Censo (INDEC)³³ y de los informes de la Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas (DEIE)³⁴, del Ministerio de Economía, Infraestructura y Energía del Gobierno de Mendoza de los años 2010 y 2016. La información se obtuvo para los departamentos de Ciudad, Godoy Cruz, Luján de Cuyo, Maipú, Guaymallén y Las Heras.

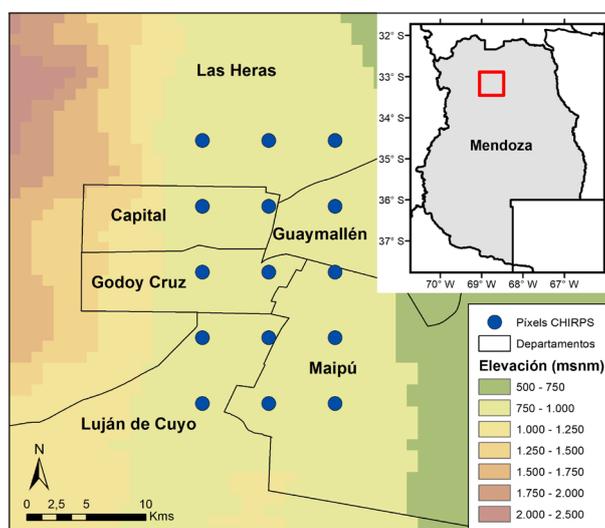


Figura 1: Área de estudio correspondiente a la zona urbana del Gran Mendoza, con la distribución espacial de los 15 puntos de retícula pertenecientes al producto satelital CHIRPS, la ubicación de los Departamentos analizados y las características del relieve.

c) Cuantificación de la amenaza por precipitaciones intensas

Para la selección de umbrales de precipitaciones intensas, primero se identificaron fechas de impactos sociales y económicos asociados a estos eventos en base a información obtenida de los principales portales de noticias de la Provincia de Mendoza. Para estas fechas se identificó la precipitación diaria estimada a partir del producto CHIRPS en los puntos de retícula seleccionados. A partir de los datos obtenidos, se establecieron 3 umbrales de precipitación y se identificó la frecuencia de ocurrencia de los eventos de precipitación diaria que superaban dichos umbrales en los 15 puntos de retícula durante 1986-2018. Luego se utilizó un sistema de ponderación para dar más relevancia a los eventos más peligrosos, multiplicando por 1 la frecuencia de casos superiores al umbral 1, por 2 la frecuencia de casos superiores al umbral 2 y por 3 la frecuencia de casos superiores al umbral 3 en cada punto de retícula. Un abordaje similar se llevó a cabo por Shahid y Behrawan³⁵ y Kim *et al.*³⁶ para la cuantificación de la amenaza de sequías.

La fórmula utilizada para realizar el cálculo de la amenaza por precipitaciones intensas es la siguiente:

$$Amenaza_i = \left[\left(\sum (n_i \geq Umbral_1) \times 1 \right) + \left(\sum (n_i \geq Umbral_2) \times 2 \right) + \left(\sum (n_i \geq Umbral_3) \times 3 \right) \right]$$

para $i = 1, \dots, 15$ puntos de retícula; con n_i la cantidad de eventos de precipitación que superan los umbrales considerados en el punto i .

A partir de la sumatoria de las frecuencias ponderadas en cada punto de retícula se calcularon los terciles de la distribución de los valores de amenaza, con el propósito de clasificar zonas con amenaza baja, media y alta.

d) Cuantificación de la vulnerabilidad social por precipitaciones intensas

Para conocer la vulnerabilidad en el Gran Mendoza, se calculó el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS). El mismo se crea a partir de diferentes indicadores sociales y económicos, y sus valores se expresan como proporción relativa del total de la población o del total de hogares, según corresponda³⁷. Esta forma de expresar los valores permite una comparación entre indicadores de distritos con realidades socio-económicas distintas. Una metodología similar fue llevada a cabo por Garnica Peña y Alcántara Ayala¹¹, quienes desarrollaron un índice de vulnerabilidad social a partir de 17 variables asociadas a población, educación, empleo y vivienda en el norte de Veracruz, México; y por Cutter y Finch³⁸, mediante la selección de 11 indicadores sociales y económicos en Estados Unidos, entre otros autores^{39,40,41}. La selección de estos indicadores es subjetiva y depende de la disponibilidad de datos a partir de los censos nacionales y provinciales. Asimismo, estos índices fueron elegidos de manera tal que expresen una medida de vulnerabilidad frente a la ocurrencia de precipitaciones intensas. En este estudio se seleccionaron 10 indicadores vinculados a la vulnerabilidad de la población y los hogares, los cuales fueron expresados como porcentaje total por departamento. Los indicadores para cada grupo son los siguientes:

- Hogares vulnerables: pisos de tierra o ladrillo suelto, hogar tipo rancho, hogar tipo casilla, problemas con el suministro del agua, problemas de aislamiento por condiciones climáticas o terrenos inundables y calidad constructiva insuficiente.
- Población vulnerable: necesidades básicas insatisfechas (NBI), porcentaje de población que no completó el nivel de educación primaria, porcentaje de población que no completó el nivel de educación secundaria y tasa de analfabetismo. El indicador de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) considera las condiciones sanitarias, de hacinamiento, de asistencia escolar y la capacidad de subsistencia³³. Si bien para la cuantificación de la población vulnerable se tuvieron en cuenta tres indicadores de educación, esto se debe a que la falta de una educación completa es una condición que podría generar una mayor susceptibilidad de sufrir daños frente a las amenazas presentes. Por ejemplo, un mayor porcentaje en estos indicadores sugeriría una menor capacidad de la población a interpretar alertas por parte de los organismos de defensa civil y esto resultaría en una incapacidad para responder o enfrentar adecuadamente a eventos de precipitaciones intensas.

Luego los indicadores se agruparon sumando sus valores porcentuales por departamento. La fórmula utilizada para calcular la vulnerabilidad social fue la siguiente:

$$IVS = [(HVd + PVd) \times 100] \div (HVt + PVt)$$

HVd: hogares vulnerables por departamento

PVd: población vulnerable por departamento

HVt: hogares vulnerables totales de los departamentos

PVt: población vulnerable total de los departamentos

A continuación se calcularon los terciles de los valores de IVS y se clasificó la vulnerabilidad en 3 categorías: alta, media y baja.

e) Riesgo por precipitaciones intensas

El riesgo es producto de la amenaza por un evento climático, la vulnerabilidad y exposición de la sociedad o ambiente². De acuerdo al Manual para la elaboración de mapas de riesgo del Ministerio de Seguridad de la Nación⁴², la exposición se contempla como parte integral de la vulnerabilidad y para esta investigación se considera de valor unitario y constante en el tiempo. Por lo tanto, el cálculo de riesgo en la región del Gran Mendoza resulta del producto entre la amenaza y la vulnerabilidad, coincidiendo con lo expresado por otros autores como Tsakiris⁴³, Garnica Peña y Alcántara Ayala¹¹, Magaña¹⁰ y Kim *et al.*³⁶ entre otros:

$$Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad$$

A fin de calcular el riesgo a escala departamental, se realizó un promedio de la amenaza considerando los píxeles de cada departamento. Los valores obtenidos de riesgo se dividieron en 3 categorías por medio del cálculo de terciles (alto, medio y bajo), lo que permitió la elaboración de un mapa de riesgo frente a precipitaciones intensas.

Resultados

a) Amenaza

Para la determinación de los umbrales de precipitaciones intensas se identificaron inicialmente 20 fechas donde se observaron impactos sociales, económicos y ambientales asociados a la ocurrencia de eventos de lluvia. Estas fechas se identificaron a través de publicaciones en los principales portales periodísticos del Gran Mendoza entre los meses de octubre a abril del período 2015-2018. Se analizó la cantidad de precipitación correspondiente al día de la publicación de la noticia periodística y de 4 días anteriores a la misma en los 15 puntos de retícula del producto CHIRPS. Se observó que en 7 de las 20 fechas identificadas la ocurrencia de mayor precipitación fue el mismo día. Mientras que en 2 de las 20 fechas se registró la mayor precipitación entre el mismo día y el anterior, en 4 de las mismas fechas se registró el día anterior, y en otras 6 fechas la mayor precipitación ocurrió entre 1, 2, 3 y 4 días anteriores. Esto se debe a que en algunas publicaciones el evento de precipitación había ocurrido algunos días antes pero los impactos en la población aún continuaban, como por ejemplo cortes de agua o luz y anegamiento de viviendas, entre otros. Se destaca que en 1 de las 20 fechas seleccionadas no se registraron precipitaciones en los 15 píxeles del área de estudio, lo cual puede dar cuenta de un fenómeno asociado a ráfagas de viento generadas por tormentas en regiones aledañas al Gran Mendoza. De esta manera quedaron determinados 3 umbrales de precipitación, de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 1, a partir de 19 fechas con impactos seleccionadas. Cabe destacar que dos de los umbrales seleccionados corresponden a los indicadores R10mm y R20mm, lo cual confirma que en regiones semi-áridas no necesariamente valores elevados de lluvia son capaces de causar impactos negativos significativos.

Tabla 1. Umbrales de precipitación (mm) identificados a partir de sus impactos asociados en el Gran Mendoza.

| Precipitación (mm) | Impactos asociados |
|--------------------|--|
| 10 | Cortes de luz, caídas de árboles y ramas, y destrozos de materiales. |
| 15 | Se afecta la potabilización, cortes de agua y luz, caídas de árboles y ramas, y destrozos de materiales. |
| 20 | Inundaciones, colapso de cloacas y acequias, evacuaciones, cortes de agua y luz, caídas de árboles y ramas, y destrozos de materiales. |

La Figura 2 muestra la cantidad de casos que superaron los umbrales de 10 mm (Figura 2a), 15 mm (Figura 2b) y 20 mm (Figura 2c) durante los meses de octubre a abril en el período 1986-2018. Los píxeles ubicados en los extremos norte y sudoeste del área de estudio son los que registraron en total una menor frecuencia en eventos de lluvia que superaron los 10 mm, con menos de 190 casos. En la zona central se observó la mayor cantidad de casos, superando los 200 eventos en 4 de los píxeles seleccionados (Figura 2a). Considerando los eventos que superaron 15 mm de precipitación, la distribución espacial resultó similar a lo observado para el umbral de 10 mm, con las mayores frecuencias en el centro del área de estudio, superando los 100 casos, mientras que valores inferiores a los 90 casos se registraron mayormente en los píxeles ubicados al norte y al sur (Figura 2b). En cuanto a la frecuencia de eventos que excedieron los 20 mm, en el centro y este de la región se observaron los mayores valores, alcanzando hasta 71 casos, mientras que en el norte de la región predominó la menor frecuencia de eventos, con menos de 47 eventos (Figura 2c). En general Godoy Cruz es el departamento en el que se observa la mayor cantidad de eventos que superan los umbrales seleccionados durante el período 1986-2018 (Figura 2).

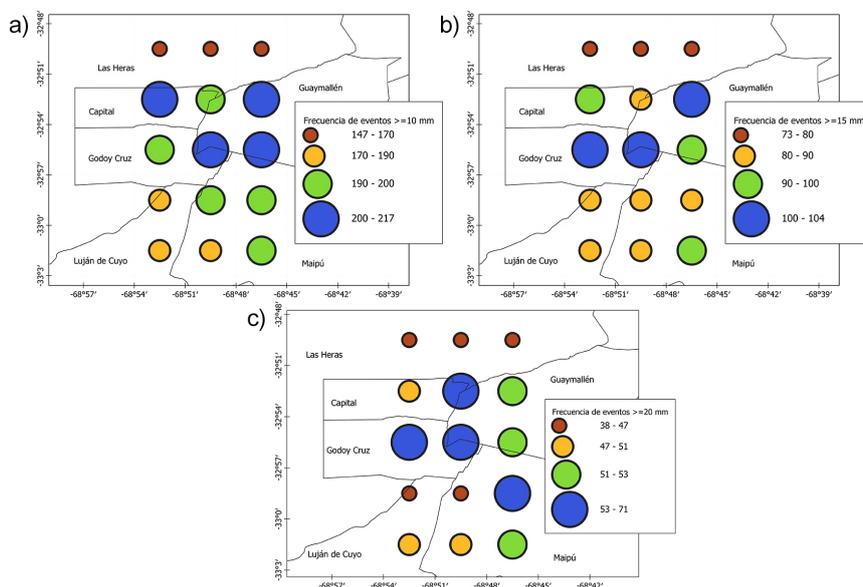


Figura 2: Frecuencia de los eventos que registraron más de 10 mm (panel a), 15 mm (panel b) y 20 mm (panel c) de precipitación en la región de estudio durante el período 1986-2018.

A partir de la suma de las frecuencias ponderadas y la clasificación de los valores resultantes en terciles, se obtuvo un mapa de amenaza por precipitaciones intensas para la región del Gran Mendoza (Figura 3). Se observa un nivel de amenaza alta y media hacia el centro y el este de la región de estudio, mientras que el nivel de amenaza bajo se concentra hacia el norte y suroeste de la región. Particularmente la amenaza alta se concentra en zonas pertenecientes a los departamentos de Godoy Cruz, Guaymallén, y Capital. Un nivel medio de amenaza se observa en la región entre los departamentos de Capital y Guaymallén y en gran parte del departamento de Maipú; mientras que niveles de amenaza bajos se observan en los píxeles correspondientes a Luján de Cuyo y Las Heras.

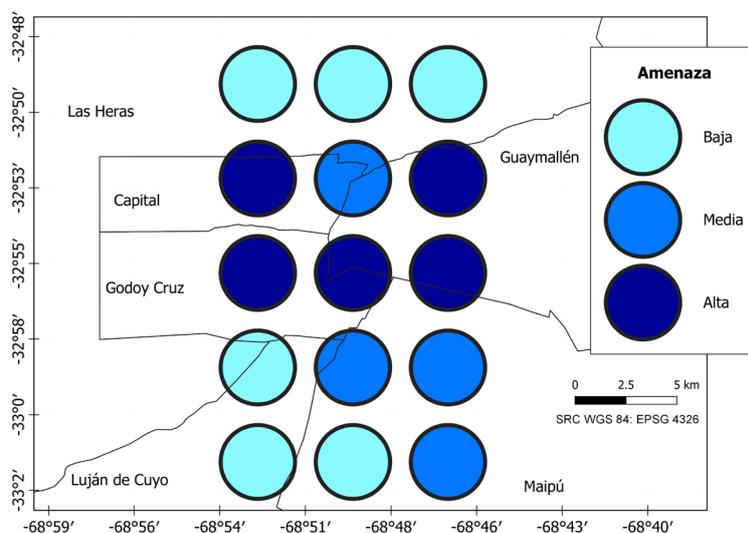


Figura 3: Mapa de la amenaza por precipitaciones intensas en la región del Gran Mendoza, Mendoza, Argentina. Los diferentes niveles de la amenaza en el área se representan mediante colores.

b) Vulnerabilidad

A continuación se muestran los resultados obtenidos, primero para los indicadores seleccionados y su proporción con respecto al total de hogares y población por departamento (Tabla 2), luego el total de la sumatoria de la proporción de los dos indicadores creados: hogares vulnerables y población vulnerable (Tabla 3). A partir de estos resultados, se obtuvieron los valores de IVS para cada departamento y luego el mapa de vulnerabilidad social frente a precipitaciones intensas en el Gran Mendoza (Figura 4).

Relacionado a los datos de los 10 indicadores seleccionados, Luján de Cuyo presenta la mayor proporción de hogares de tipo rancho y con problemas de aislamiento por condiciones climáticas o terrenos inundables; Maipú contiene la mayor proporción de hogares con calidad constructiva insuficiente, de población con al menos un indicador de necesidades básicas insatisfechas, de población que no completó primaria y secundaria y con la mayor tasa de analfabetismo; mientras que Las Heras es el departamento con una mayor cantidad de hogares con piso de tierra y de tipo casilla, y Guaymallén tiene más cantidad de hogares con problemas relacionados al suministro de agua (Tabla 2). De acuerdo a los datos de los 2 indicadores creados, Las Heras y Luján de Cuyo tienen la mayor proporción de hogares vulnerables y Maipú y Luján de Cuyo tienen la mayor proporción de población vulnerable (Tabla 3).

De acuerdo a los resultados obtenidos del cálculo del IVS, se determina que Maipú y Luján de Cuyo presentan una vulnerabilidad alta, le siguen Las Heras y Guaymallén con una vulnerabilidad media, y finalmente Godoy Cruz y Capital con una baja vulnerabilidad (Figura 4). Por lo tanto los departamentos que presentan las mayores proporciones de población y hogares vulnerables frente a precipitaciones intensas son los de mayores niveles de vulnerabilidad. Asimismo, que Godoy Cruz y Capital posean una baja vulnerabilidad no significa que no sean susceptibles de presentar daños ante la presencia de la amenaza por precipitaciones intensas, sino que en comparación de los otros departamentos son los departamentos que tienen un menor grado de susceptibilidad.

Tabla 2. Indicadores seleccionados para cuantificar la vulnerabilidad, obtenidos a partir de datos del INDEC 2010 y DEIE 2010 y 2016.

| Indicadores | Capital | Godoy Cruz | Las Heras | Luján de Cuyo | Guaymallén | Maipú |
|---|---------|------------|-----------|---------------|------------|--------|
| Total de hogares * | 39136 | 57375 | 59978 | 32233 | 79770 | 46569 |
| Total de población * | 115041 | 191903 | 203666 | 119888 | 283803 | 172332 |
| Hogares, piso de tierra o ladrillo suelto (%) * | 0.94 | 0.55 | 2.68 | 1.73 | 1.45 | 1.92 |
| Hogares tipo rancho (%) * | 0.89 | 0.32 | 2.17 | 2.35 | 1.14 | 1.63 |
| Hogares tipo casilla (%) * | 0.35 | 0.24 | 0.68 | 0.57 | 0.36 | 0.38 |
| Problemas con el suministro del agua (%) ** | 16.00 | 26.40 | 34.50 | 31.20 | 35.70 | 27.60 |
| Problemas de aislamiento (%) ** | 7.90 | 11.00 | 21.50 | 27.10 | 22.50 | 23.70 |
| Calidad constructiva insuficiente (%) *** | 5.99 | 4.96 | 13.10 | 13.10 | 11.90 | 18.29 |
| NBI, con al menos un indicador (%) *** | 5.80 | 5.80 | 11.00 | 9.10 | 8.90 | 11.10 |
| Población que no completó primaria (%) ** | 3.50 | 7.00 | 9.30 | 10.90 | 11.70 | 15.20 |
| Población que no completó secundaria (%) ** | 25.00 | 32.10 | 42.80 | 44.10 | 41.00 | 49.00 |
| Tasa de analfabetismo (%) *** | 1.10 | 0.90 | 1.60 | 2.20 | 1.60 | 2.40 |

% = porcentaje del total de hogares o población, según corresponda

* = INDEC 2010

** = DEIE 2016

*** = DEIE 2010

Tabla 3. Indicadores de vulnerabilidad creados, obtenidos a partir de datos de INDEC 2010 y DEIE 2010 y 2016. Cada uno representa la sumatoria de la proporción de indicadores de hogares y población vulnerables.

| | Capital | Godoy Cruz | Las Heras | Luján de Cuyo | Guaymallén | Maipú |
|----------------------|---------|------------|-----------|---------------|------------|-------|
| Hogares vulnerables | 32.07 | 43.48 | 74.62 | 76.05 | 73.05 | 73.52 |
| Población vulnerable | 35.40 | 45.80 | 64.70 | 66.30 | 63.20 | 77.70 |

Hogares vulnerables = sumatoria de los indicadores de pisos de tierra o ladrillo suelto, hogar tipo rancho, hogar tipo casilla, problemas con el suministro del agua, problemas de aislamiento por condiciones climáticas o terrenos inundables y calidad constructiva insuficiente.

Población vulnerable = sumatoria de indicadores de necesidades básicas insatisfechas (NBI) con presencia de al menos un indicador, porcentaje de población que no completó el nivel de educación primaria, porcentaje de población que no completó el nivel de educación secundaria y tasa de analfabetismo.

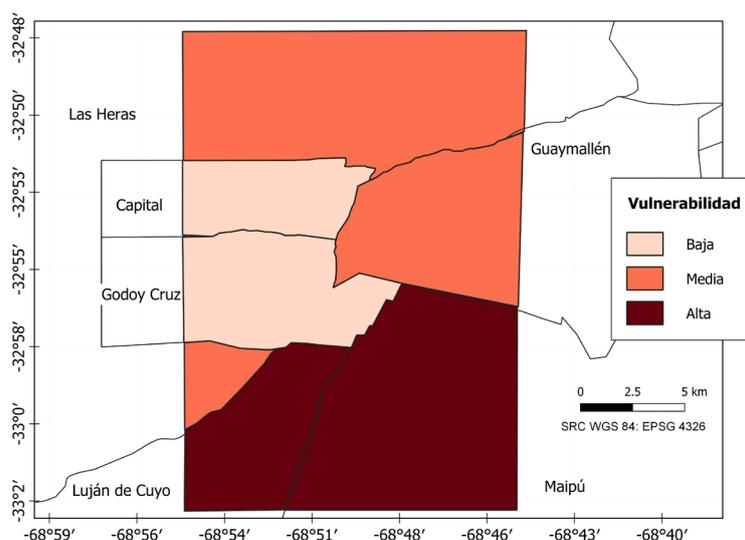


Figura 4: Mapa de vulnerabilidad social en el Gran Mendoza, Mendoza, Argentina. Los diferentes niveles de vulnerabilidad en el área se representan mediante colores.

c) Riesgo

Mediante el mapa de riesgo se observa que el sureste del Gran Mendoza, abarcando parte de Maipú y Guaymallén, es el que presenta el mayor riesgo frente a precipitaciones intensas, le siguen las áreas contenidas en Las Heras y Luján de Cuyo con riesgo medio y con un nivel de riesgo bajo el área de los departamentos de Godoy Cruz y Capital (Figura 5). A pesar de que el área en Godoy Cruz presenta amenaza alta, su vulnerabilidad es la más baja; una situación similar presenta la ubicada en el departamento de Capital con amenaza media pero vulnerabilidad baja. Por lo tanto a pesar de que en ambas regiones su amenaza es alta y media, respectivamente, los mismos tienen una menor susceptibilidad a sufrir daños frente a los eventos de lluvias intensas. Esta es la razón por la cual al combinar amenaza y vulnerabilidad sus valores de riesgo son menores que el resto de la región de estudio.

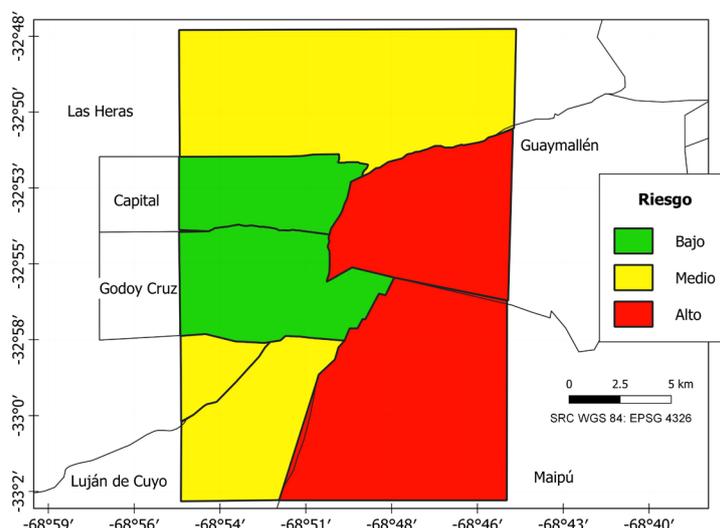


Figura 5: Mapa del riesgo frente a precipitaciones intensas en la región del Gran Mendoza, Argentina. Los diferentes niveles de riesgo en el área se representan mediante colores.

Discusión

Esta investigación permitió identificar aquellos departamentos que se encuentran en mayor riesgo frente a la amenaza por precipitaciones intensas, como así también los más vulnerables frente al mismo fenómeno. Conocer la vulnerabilidad de una región frente a un evento permite mitigar y prevenir los daños que puedan ocurrir como así también mejorar la adaptabilidad; e identificar el riesgo ayuda a definir las regiones en las que se debe actuar con mayor urgencia para reducir la vulnerabilidad^{9,44,10}.

En los últimos años se ha detectado un incremento de los eventos extremos de precipitación a escala diaria en la Provincia de Mendoza^{45,46}. Esto mismo coincide con los incrementos detectados en Argentina y a nivel mundial en los últimos 40 años^{45,47}. Este aumento en la frecuencia de eventos de precipitación intensa podría modificar la distribución espacial de la amenaza en la región de estudio, por lo que resultaría necesario analizar los cambios del riesgo a lo largo del tiempo. Además la vulnerabilidad también podría presentar cambios temporales, que podrían identificarse utilizando datos del INDEC de los años 2001 y 2010. No obstante, esto requiere el uso de los mismos indicadores socio-económicos para una correcta comparación de los valores del IVS. Asimismo, el uso de datos distritales permitiría identificar y priorizar áreas dentro de los departamentos que son más susceptibles de presentar daños frente a precipitaciones fuertes. Ejemplos de estudios que identificaron cambios temporales en la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo son los realizados por Zúñiga y Magaña¹⁴, Hari *et al.*³⁹ y Cutter y Finch³⁸, entre otros.

Este trabajo presenta algunas limitaciones y aproximaciones que se efectuaron a fin de brindar robustez estadística a los resultados obtenidos. Se destaca el hecho de haber considerado umbrales de precipitación subjetivos en lugar de haber definido la ocurrencia de eventos extremos a partir del uso de percentiles como umbrales de excedencia. Esto se sustenta en el hecho de que por ser Mendoza parte de una región con clima semi-árido, la ocurrencia de precipitaciones nulas es una característica frecuente a lo largo del año. Esto impacta significativamente en la cuantificación de los percentiles, dado que requieren una muestra lo suficientemente grande como para brindar un resultado estadístico robusto. Con respecto a la identificación de impactos en la cuantificación de la amenaza, a pesar de que algunos impactos tenidos en cuenta no están asociados exclusivamente a la lluvia, la intensidad de las precipitaciones se encuentra relacionada con la ocurrencia de otros fenómenos como vientos descendentes con ráfagas y/o granizo. En relación a la cuantificación de la vulnerabilidad, el mapa obtenido es representativo de las zonas mayormente urbanas dado que el área de estudio concentra la mayor cantidad de población de los departamentos del Gran Mendoza. Con lo cual los resultados no deben extrapolarse a regiones que no han sido consideradas, a pesar de que los datos utilizados son a nivel departamental.

Conclusiones

Esta investigación permitió obtener un mapa de riesgo asociado a la ocurrencia de precipitaciones intensas para la región del Gran Mendoza, Argentina. Siendo el riesgo resultante de la combinación entre la amenaza y la vulnerabilidad, se cuantificaron ambas componentes a partir de estimaciones de precipitación e indicadores socio-económicos. En relación a la vulnerabilidad, se obtuvo que Luján de Cuyo y Maipú tienen un nivel alto, mientras que Las Heras y Guaymallén tienen un nivel medio y Capital y Godoy Cruz una vulnerabilidad baja. En lo que respecta a la amenaza, los píxeles ubicados en el centro y este del dominio de estudio son los que poseen un nivel más alto, asociado a una mayor frecuencia de eventos de precipitaciones intensas. A partir de la combinación de estos resultados, se obtuvo que los departamentos que presentan un mayor riesgo son Guaymallén y Maipú, mientras que Las Heras y Luján de Cuyo presentan un nivel de riesgo medio y, Capital y Godoy Cruz un nivel de riesgo bajo.

Agradecimientos

Los resultados de esta investigación se lograron en el marco del proyecto «Análisis de eventos extremos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza: Variabilidad espacio-temporal y forzantes atmosféricos asociados». Los autores desean agradecer a la Universidad Juan Agustín Maza por el financiamiento del mismo. Se agradece además al *Climate Hazard Center* de la Universidad de California en Santa Bárbara por la provisión de las estimaciones de precipitación del producto CHIRPS (<https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>).

Artículo completo

Ciencias Ambientales, Agroindustrias y de la Tierra

Bibliografía

- 1 Coy, M. Los estudios del riesgo y de la vulnerabilidad desde la geografía humana. Su relevancia para América Latina. *Población & Sociedad*. 2010; ISSN 0328-3445. 17:9-28.
- 2 IPCC. Annex I: Glossary [Weyer, N.M. (ed.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019.
- 3 Barros, V. y Camilloni, I. *La Argentina y el cambio climático: de la física a la política*. Argentina: Eudeba; 2016.
- 4 Mukhopadhyay, P; Krishnan, R; Nanjundiah, R. S. y Mohapatra, M. Prediction of Extreme Events: Current Status and Future Pathways against the Backdrop of Climate Change. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2020; 101: E1137-E1141. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0037.1
- 5 IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 2012
- 6 Van Aaslt, M. The impacts of climate change on the risk of natural disasters. *Disasters*. 2006; 30(1): 5-18. DOI: 10.1111/j.1467-9523.2006.00303.x
- 7 Zwiers, F. y Kharin, V. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. *Journal of climate*. 1997; 11: 2200-2222. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2
- 8 Tabari, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*. 2020; 10(1): 13768. DOI: 10.1038/s41598-020-70816-2
- 9 Renda E; Rozas Garay, M; Moscardini, O. y Torchia, N.P. Manual para la elaboración de mapas de riesgo. Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Ministerio de Seguridad de la Nación; Argentina. 2017.
- 10 Magaña, V. Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante el Cambio Climático. Proyecto de la Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC). 2012.
- 11 Garnica Peña, R. J. y Alcántara Ayala, I. Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 2004; 55: 23-45. DOI: 10.14350/rig.30109
- 12 Plaza, G; Perales, A. y Cabral, C. Variabilidad de precipitaciones en el NOA y el riesgo ambiental. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2006; 10: 87-92. ISSN 0329-5184
- 13 Othmer, F. J; Becker, D; Schulte, L. M. y Greiving, S. A methodological approach to municipal pluvial flood risk assessment bases on a small city case study. *Sustainability*. 2020, 10487. DOI: 10.3390/su122410487
- 14 Zúñiga, E. y Magaña, V. Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change. *Investigaciones Geográficas*. 2017; 95. DOI: 10.14350/rig.59465
- 15 Vörösmarty, C. J; de Guenni, L. B; Wollheim, W. M.; Pellerin, B; Bjerklie, D; Cardoso, M; D'Almeida, C; Green, P. y Colon, L. Extreme rainfall, vulnerability and risk: a continental-scale assessment for South America. *Phil Trans R Soc A*. 2013; 371: 20120408. DOI: 10.1098/rsta.2012.0408
- 16 Biles, J.J. y Cobos, D. Natural disasters and their impact in Latin America, in: Stoltman, J.P., Lidstone, J., DeChano, L.M. (Eds.), *International Perspectives on Natural Disasters: Occurrence, Mitigation, and Consequences*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 2007; 281-302. DOI: 10.1007/978-1-4020-2851-9_15
- 17 Vich, A. I. J; López Rodríguez, M; Lauro, C. y Vaccarino, E. Proposals for Flashflood Management in Western Argentina. Case Study: The Metropolitan Area of Greater Mendoza. *Current Urban Studies*. 2014; 2: 37-48. DOI: 10.4236/cus.2014.21004
- 18 Cisneros, H; Torres, J; Fermani, S; Grintal, M; Bisogno, V. F; Castañón, E; Suklje, M; Orive, O. y Cerrudo, L. Determination of physical variables of the mendocino piedmont through the use of remote sensing tools in relation to geological risks. *Serie Correlación Geológica*. 2017; 33 (1 - 2): 101-110. ISSN 1514-4186
- 19 Simonelli, S. C; Norte, F. A; Heredia, N. O. y Seluchi, M. The storm of January 1, 2000, north of the city of Mendoza. *Atmósfera*. 2007; 20(1): 1-23. ISSN 0187-6236.
- 20 Mesa, A. y Giusso, C. 2014. La urbanización del piedemonte andino del área metropolitana de Mendoza, Argentina: Vulnerabilidad y segmentación social como ejes del conflicto. *Revista Iberoamericana de Urbanismo*. 2014; 11: 63-77. ISSN: 2013-6242
- 21 Vich, A. I; Vaccarino Pasquali, E. L; Otta, S. A; Lauro, C. y Bastidas, L. B. Morphometric analysis of basins located in the piedmont of central western Argentina. *Cuadernos Geográficos*. 2021; 60(1): 295-312. ISSN 0210-5462.
- 22 Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B. y Zwiers, F.W. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2011; 2(6): 851-870. DOI: 10.1002/wcc.147
- 23 Mahbod, M; Shirvani, A. y Veronesi, F. A comparative analysis of the precipitation extremes obtained from tropical rainfall-measuring mission satellite and rain gauges datasets over a semiarid region. *Int J Climatol*. 2019; 39: 495-515. DOI: 10.1002/joc.5824
- 24 Yaduvanshi, A; Kulkarni, A. y Bendapudi, R. et al. Observed changes in extreme rain indices in semiarid and humid regions of Godavari basin, India: risks and opportunities. *Nat Hazards*. 2020; 103: 685-711. DOI: 10.1007/s11069-020-04006-8
- 25 Xu, L; Zheng, C. y Ma, Y. Variations in precipitation extremes in the arid and semi-arid regions of China. *International Journal of Climatology*. 2020; 41: 1542-1554. DOI: 10.1002/joc.6884
- 26 Moreiras, S.M. Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. *Quaternary International*. 2006; 158: 110-121. DOI: 10.1016/j.quaint.2006.05.028
- 27 Rivera, J.A; Naranjo Tamayo, E. y Viale, M. Water resources change in Central-Western Argentina under the Paris Agreement warming targets. *Front. Clim*. 2020; 2: 587126. DOI: 10.3389/fclim.2020.587126

- 28 Doyle, M. E. Observed and simulated changes in precipitation seasonality in Argentina. *Int. J. Climatol.* 2020; 40: 1716-1737. DOI: 10.1002/joc.6297
- 29 Climate Hazard Center [Internet]. Estados Unidos: Universidad de California en Santa Bárbara. Disponible en: <https://www.chc.ucsb.edu/>.
- 30 Funk, C; Peterson, P; Landsfeld, M. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data.* 2015; 2: 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66
- 31 Rivera, J. A; Marianetti, G. y Hinrichs, S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research.* 2018; 213: 437-449. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.06.023
- 32 Rivera, J. A; Hinrichs, S. y Marianetti, G. Using CHIRPS Dataset to Assess Wet and Dry Conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology.* 2019; 2019: 1-18. DOI: 10.1155/2019/8413964
- 33 Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) [Internet]. Argentina: Ministerio de Economía de la Nación. Disponible en: (<https://www.indec.gob.ar/>)
- 34 Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas (DEIE) [Internet]. Mendoza, Argentina: Ministerio de Economía, Infraestructura y Energía. Disponible en: (<http://www.deie.mendoza.gov.ar>).
- 35 Shahid, S. y Behrawan, H. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Nat. Hazards.* 2008; 46: 391-413. DOI: 10.13140/RG.2.1.3343.0167
- 36 Kim, H; Park, J; Yoo, J. y Kim, T. W. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-environment Research.* 2013; 9(1): 28-35. DOI: 10.1016/j.jher.2013.07.003
- 37 Thomas Bohórquez, J. E. Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales en Manzanillo (Colima). Un aporte de método. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.* 2013; 81: 79-93. DOI: 10.14350/rig.36383
- 38 Cutter, S. L. y Finch, C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2008; 105(7):2301-2306. DOI: 10.4324/9781351201117-16
- 39 Hari, V; Karmakar, S; Ghosh, S. y Murtugudde, R. A comprehensive India-wide social vulnerability analysis: highlighting its influence on hydro-climatic risk. *Environ. Res. Lett.* 2020; 15: 014005. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6499
- 40 Lixin, Y; Xi, Z; Lingling, G. y Dong, Z. Analysis of social vulnerability to hazards in China. *Environmental Earth Sciences.* 2013; 71(7), 3109-3117. DOI: 10.1007/s12665-013-2689-0
- 41 De Loyola Hummell, B. M; Cutter, S. L. y Emrich, C. T. (2016). Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Science.* 2016; 7(2): 111-122. DOI: 10.1007/s13753-016-0090-9
- 42 Ministerio de Seguridad de la Nación. Manual para la elaboración de mapas de riesgo; Buenos Aires, Argentina. 2017.
- 43 Tsakiris G. A paradigm for applying risk and hazard concepts in proactive planning. In: Iglesias et al (eds) Copying with Drought Risk in Agriculture in Water Supply Systems. Springer, Netherlands. 2009; 81-91.
- 44 Musetta, P; Barrientos, M.J; Acevedo, E; Turbay, S. y Ocampo Olga. Vulnerabilidad al cambio climático: Dificultades en el uso de indicadores en dos cuencas de Colombia y Argentina. *Empiria: Revista de Metodología de Ciencias Sociales.* 2017; 36: 119-147. DOI: 10.5944/empiria.36.2017.17862
- 45 Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS). (2015). Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones. Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- 46 Castex, V; Morán-Tejada, E. y Beniston, M. Water availability, use and governance in the wine producing region of Mendoza, Argentina. *Environmental science & policy.* 2015; 48: 1-8. DOI: 10.1016/j.envsci.2014.12.008
- 47 IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.