

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO: UN ANÁLISIS ESPACIAL DEL RIESGO EN EL SUR DE LA REGIÓN PAMPEANA (ARGENTINA)

Andrea Soledad Brendel^{1,2}

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es analizar los cambios temporales y espaciales del riesgo futuro al cambio climático en el sur de la Región Pampeana de Argentina, considerando dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5) durante los años 2030, 2050 y 2100. La metodología utilizada incluyó el análisis integral de datos climáticos, como la temperatura y la precipitación media, y datos sociales, como el índice de vulnerabilidad social. Esto permitió describir las amenazas y la vulnerabilidad social, y posteriormente calcular el riesgo. El área de estudio registró un aumento de la precipitación media futura, ocasionando categorías de riesgo de mayor magnitud que al considerar la temperatura, especialmente en el RCP 8.5 y en el año 2100. Además, esta categoría fue observada en situaciones de alta vulnerabilidad social, específicamente en el partido donde se localiza la ciudad más importante de la región. Por lo tanto, esta investigación proporciona información fundamental para los tomadores de decisiones, quienes pueden utilizarla como base para la elaboración de planes de manejo del espacio y el diseño de medidas efectivas de adaptación y mitigación al cambio climático, teniendo en cuenta que los eventos extremos húmedos están afectando la región con cada vez mayor frecuencia.

Palabras clave: cambios térmicos y pluviométricos; vulnerabilidad social; datos modelados; cruce de información; sudoeste bonaerense.

CLIMATE CHANGE IMPACT: A SPATIAL ANALYSIS OF RISK IN THE SOUTHERN PAMPEAN REGION (ARGENTINA)

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze the temporal and spatial changes in future climate change risk in the southern Pampean Region of Argentina, considering two scenarios of greenhouse gas concentration (RCP 4.5 and 8.5) during the years 2030, 2050, and 2100. The methodology used included the comprehensive analysis of climate data, such as temperature and average precipitation, and social data, such as the social vulnerability index. This allowed for the description of threats and social vulnerability, followed by the calculation of risk. The study area recorded an increase in future average precipitation, resulting in higher-risk categories than when considering temperature, especially in RCP 8.5 and in the year 2100. Additionally, this category was observed in situations of high social vulnerability, specifically in the district where the most important city in the region is located. Therefore, this research provides crucial information for decision-makers, who can use it as a basis for the development of spatial management plans and the design of effective adaptation and mitigation measures to climate change, considering that extreme wet events are affecting the region with increasing frequency.

Key words: thermal and rainfall changes; social vulnerability; modeled data; information crossing; southwestern Buenos Aires.

¹ Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET. Argentina.

² Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS). Argentina E-mail: andrebrendeluns@gmail.com; asbrendel@iado-conicet.gob.ar

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la sociedad contemporánea (FOGUESATTO *et al.*, 2020). Se define como el cambio en los patrones climáticos y es causado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas naturales y las actividades humanas (FAWZY *et al.*, 2020). Los sistemas naturales incluyen incendios forestales, terremotos, océanos, permafrost, humedales, volcanes, entre otros (YUE y GAO, 2018), mientras que las actividades humanas están predominantemente relacionadas con la producción de energía, las actividades industriales, como así también la silvicultura y el uso y cambios en las coberturas de la tierra (FAWZY *et al.*, 2020). Según el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC, 2021), las últimas cuatro décadas han sido sucesivamente más cálidas que cualquier década que la precedió desde 1850. La temperatura media del aire de las últimas dos décadas del siglo XXI (2000-2020) fue 1 °C más alta que la de 1850-1900 y a su vez fue 1,1 °C superior en 2011-2020 que en 1850-1900. Este incremento fue producto de la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de las actividades humanas, principalmente el CO₂ (PADHIARY *et al.*, 2018), el cual registró las concentraciones más altas en al menos 2 millones de años durante el año 2019 (IPCC, 2021). Como consecuencia, se prevé que la temperatura promedio mundial durante los próximos 20 años alcance o superare un calentamiento de 1,5 °C alrededor de 2040 (IPCC, 2021).

Por otro lado, la precipitación también presentó tendencia positiva en la mayor parte del globo desde 1950, con una tasa de incremento más rápida desde 1980 (IPCC, 2021). En ese sentido, se han registrado aumentos en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones globales debido a la mayor disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera resultante del aumento de la temperatura (MUTHUWATTA *et al.*, 2018; IPCC, 2021). Sin embargo, este parámetro presenta un patrón de distribución espacial más complejo en comparación con lo que ocurre con la temperatura (CHEN *et al.*, 2018). En algunas regiones del mundo, como por ejemplo, en el sur de China (WANG *et al.*, 2018), sur de Europa (DAI y ZHAO, 2017), en la Península Ibérica (GONZÁLEZ-HIDALGO *et al.*, 2018) entre otras, el cambio climático aumentó la intensidad de las sequías agrícolas, aun en regiones húmedas (HUO-PO *et al.*, 2013). Hacia el futuro, se proyecta que la variabilidad y los extremos de la precipitación aumentarán en numerosas partes del mundo, pero la magnitud y la dirección de estos cambios variarán según la región y los escenarios de gases de efectos invernadero considerados (IPCC, 2021).

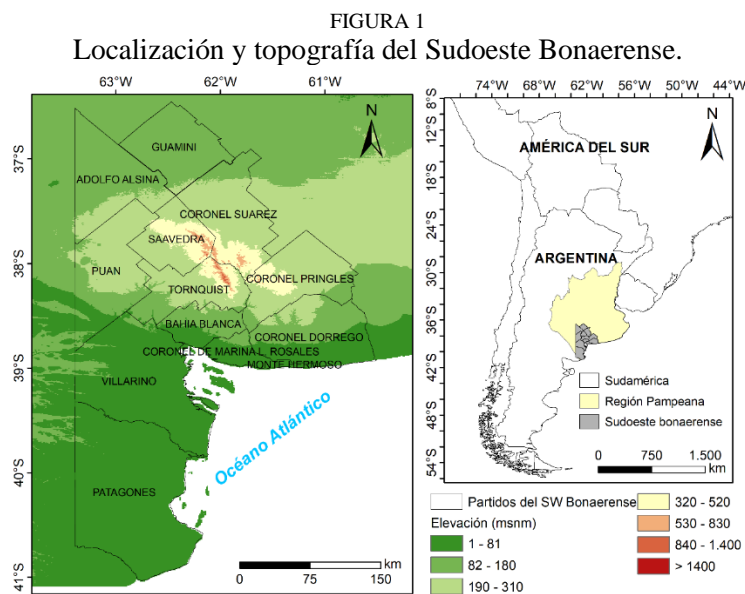
Desde el punto de vista analítico, el riesgo está compuesto por dos dimensiones: la peligrosidad o amenaza, definida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o tecnológico con potencialidad de impactos negativos (NATENSON, 2015), y la vulnerabilidad, que refiere a las condiciones sociales, económicas, culturales, etc., que exponen a una población y la hacen propensa a ser afectada y sufrir daño respecto de una peligrosidad (LAVELL, 1996). En ese sentido, durante el año 2018 se registraron 315 casos de desastres naturales relacionados con el cambio climático, como sequías, temperaturas extremas, inundaciones, entre otros. Estos eventos afectaron a 68.5 millones de personas y ocasionaron una pérdida económica de \$131 mil millones de dólares. Por lo tanto, la evaluación del riesgo climático permite identificar las áreas más vulnerables y desarrollar estrategias de adaptación y mitigación efectivas. Esto puede incluir medidas como la diversificación de cultivos, la mejora de la infraestructura de drenaje y la planificación urbana adecuada para reducir la exposición al riesgo (BURKE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019). Según el IPCC (2021), los riesgos proyectados en los dos niveles de calentamiento global de 1,5 °C y 2 °C serán diferentes. Se estima que la mayoría de los impactos evaluados tienen riesgos asociados más bajos a 1,5 °C en comparación con el nivel de calentamiento de 2 °C. Por ejemplo, se prevé un aumento del 70 % en la población afectada por inundaciones fluviales en el escenario de 2 °C en comparación con 1,5 °C, especialmente en Estados Unidos, Europa y Asia, mientras que el estrés hídrico tendría el doble de riesgo en un nivel de calentamiento de 2 °C en comparación con 1,5 °C (IPCC, 2021). En la Región Pampeana (Argentina), se estima un aumento de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, reducción de la disponibilidad de agua dulce y cambios en el tipo y época de siembra y cosecha de los cultivos, mayor riesgo de incendios, entre otros. Por lo tanto, las comunidades y los

ecosistemas se vuelven más vulnerables a los impactos del cambio climático. Para abordar este desafío, es esencial llevar a cabo investigaciones que analicen de manera integral estos riesgos, identificando áreas críticas y desarrollando estrategias de adaptación y mitigación para reducir el impacto negativo del cambio climático en la sociedad y el ambiente. Por lo expuesto anteriormente, el objetivo de esta investigación es analizar espacio-temporalmente el riesgo ante el cambio climático futuro en el sur de la Región Pampeana (Argentina).

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de esta investigación se encuentra en el extremo sur de la Región Pampeana (Argentina) y se denomina Sudoeste Bonaerense, según la ley provincial N° 13.647 (Figura 1). Su objetivo es el de guiar las políticas públicas destinadas a impulsar el desarrollo de los sistemas productivos considerando la sustentabilidad climática. Está conformada por 13 unidades administrativas o partidos y presenta una extensión de 65.000 km². Además, cuenta con una población total de 615.000 habitantes (Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas, 2022). Esta zona se caracteriza por ser un área de transición entre los climas templados y los áridos, lo que la expone a una gran variabilidad estacional e interanual de las precipitaciones (ALIAGA *et al.*, 2017). Los eventos extremos que se registran en ella los más severos de toda la región (ALIAGA *et al.*, 2017).

Desde el punto de vista geomorfológico, el territorio objeto de estudio tiene una suave inclinación de norte a sur, desde el Sistema Serrano de Ventania (1243 msnm) hasta la línea de costa (Figura 1). Los suelos favorecen el desarrollo de las actividades agrícolas y ganaderas, aunque esta aptitud decrece con el gradiente de isohietas (de noreste a sudeste). El trigo es el principal cultivo de la zona y se desarrolla de forma extensiva bajo condiciones de secano, lo que determina que el área sea altamente dependiente de las precipitaciones (BRENDDEL *et al.*, 2017).



Fuente: elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

3.1 ANÁLISIS DEL CLIMA ACTUAL Y FUTURO

Para analizar el clima actual se analizaron las dos variables más importantes, tales como la precipitación y la temperatura media anual. Se utilizaron datos proporcionados por el modelo global CCSM4 (Community Climate System Model 4) pertenecientes al Centro Nacional de Estudios de la Atmósfera (NCAR, Estados Unidos). Este modelo se utiliza para simular el sistema climático de la Tierra y es una herramienta importante en la investigación del cambio climático. Incluye cuatro componentes que representan la atmósfera, el océano, la criosfera y la dinámica terrestre, interactuando entre sí. Se utiliza para simular una amplia gama de procesos climáticos,

como la circulación atmosférica, la circulación oceánica, el transporte de calor y humedad, la formación de nubes y la interacción entre la Tierra y la radiación solar.

Los datos fueron obtenidos de la página del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera de Argentina (CIMA - <http://3cn.cima.fcen.uba.ar>) durante el periodo 1960-2010. Se descargaron un total de 36 puntos equidistantes con una resolución espacial de 50 km. Posteriormente, los datos fueron analizados espacialmente en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.5), utilizando el método de interpolación Kriging ordinario con un tamaño de celda de 0,01. Este método asume que la distancia o la dirección entre los puntos tiene una correlación espacial que permite explicar la variación dentro de una región (MENAFIOLIO *et al.*, 2013).

La elección del modelo CCSM4 se basó en un estudio de validación llevado a cabo por el CIMA, en el marco de los estudios de base para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. El CIMA evaluó 24 modelos climáticos y utilizó un índice de validación que oscila entre 0 y 1, donde los valores cercanos a cero indican un ajuste deficiente y los valores cercanos a 1 indican un buen ajuste. El modelo CCSM4 obtuvo un valor de 0,91, lo que lo convierte en el modelo más preciso para predecir las condiciones hídricas y térmicas de la Región Pampeana (ROLLA *et al.*, 2019; BRENDEL, 2020; FERRELLI *et al.*, 2020).

Para analizar la variación de la temperatura y precipitación media anual futura se utilizaron los datos provenientes del Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados (Coupled Models Intercomparison Project, CMIP5) enmarcado dentro del programa mundial de investigación climática (World Climate Research Programme, WRCP). El modelo CMIP5 está compuesto por un total de 27 modelos con simulaciones que comprenden el período 2015-2100. Es de circulación general y utiliza como datos de entrada, las observaciones climáticas históricas y escenarios de emisiones para simular el clima pasado y futuro. Estos datos incluyen información sobre la temperatura, la concentración de gases de efecto invernadero, la actividad solar y otros forzantes climáticos. La quinta y sexta fases del CMIP (CMIP5 y CMIP6) incluyen los desarrollos más recientes en la modelización del clima global. Más detalle sobre este modelo se puede encontrar en: <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip/diagsub.html>.

Los datos del modelo CMIP5 fueron obtenidos de la base de datos del Sistema de Mapas de Riesgo del Cambio Climático (SIMARCC). En este estudio, las series de tiempo de precipitación y temperatura media anual fueron analizadas para los años 2030, 2050 y 2100. La elección de estos tres años se basó en lo expuesto por el IPCC en su último informe (2021). Este organismo menciona la necesidad de evaluar el cambio climático a diferentes plazos que sean relevantes para la toma de decisiones, la mitigación de emisiones y la adaptación a los impactos climáticos, lo que permite una comprensión más completa de las tendencias y proyecciones climáticas. El año 2030 se encuentra a un plazo relativamente corto y permite evaluar cambios climáticos en el futuro próximo. La elección de 2030 está relacionada con la necesidad de establecer objetivos y acciones a corto plazo para la mitigación del cambio climático, como los compromisos nacionales en el marco del Acuerdo de París. Por otro lado, el año 2050 es un punto intermedio que ofrece una visión a medio plazo. Esta elección se vincula a la planificación a largo plazo en sectores como la infraestructura, la energía y la agricultura. Además, muchos países y regiones han establecido objetivos para alcanzar emisiones netas cero de gases de efecto invernadero para 2050. Por último, el año 2100 es considerado un punto final a largo plazo y se utiliza para proyectar los efectos del calentamiento global si las tendencias actuales de emisiones continúan sin cambios. Esta perspectiva a largo plazo es importante para comprender el alcance completo de los cambios climáticos y sus impactos.

Por otro lado, se analizaron estos tres años bajo dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (RCP –Representative Concentration Pathways, por sus siglas en inglés). Ambos escenarios representan extremos opuestos. Por un lado, el RCP 4.5 es un escenario de mitigación en el cual las emisiones de gases de efecto invernadero se estabilizan a mediados de siglo y disminuyen gradualmente. Este escenario implica una reducción significativa en la dependencia de los combustibles fósiles y un aumento en la adopción de tecnologías de

energía limpia y eficiencia energética. Por otro lado, el RCP 8.5 representa un escenario de altas emisiones que continúan aumentando a lo largo del siglo XXI, con una dependencia constante y creciente en los combustibles fósiles, así como la ausencia de políticas efectivas de mitigación. Estos escenarios son ampliamente utilizados en los estudios actuales sobre modelización climática, siendo fundamentales para la planificación y la toma de decisiones en el contexto del cambio climático (ANDRADE et al., 2021; BADORA et al., 2022; SEO et al., 2023).

3.2. DETERMINACIÓN DEL RIESGO FUTURO

El análisis del riesgo futuro ante el cambio climático fue realizado a partir de datos obtenidos de la base nacional de datos del Sistema de Mapas de Riesgo del Cambio Climático (SIMARCC, <https://simarcc.ambiente.gob.ar>). Esta base de datos permite generar mapas de riesgo mediante el cruce de información climática futura para los años y escenarios anteriormente mencionados (como la temperatura media, máxima y mínima, la precipitación media y los índices extremos, como días con precipitaciones >50 mm, noches tropicales y días con temperaturas >35 °C, entre otros) y el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) desarrollado por NATENSON (2015) para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y obtenido ya calculado por el SIMARCC.

El IVS está compuesto por tres dimensiones que surgen del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (INDEC, 2010, Tabla 1). El IVS oscila entre 1 (vulnerabilidad social muy baja) y 5 (vulnerabilidad social muy alta). El cálculo del IVS se realiza en valores relativos y absolutos, estableciendo cinco categorías para cada uno (1: Muy Baja, 2: Baja; 3: Media, 4: Alta, 5: Muy Alta). Se obtiene un subíndice absoluto y uno relativo por cada aspecto de la vulnerabilidad: social (indicadores 1 a 4), habitacional (indicadores 5 a 7) y económica (indicadores 8 a 10). Además, se realiza el cálculo el IVS relativo y absoluto total (considerando todos los indicadores). A partir de la combinación del IVS relativo y absoluto total se obtiene un IVS síntesis, que presenta las mismas categorías (1: Muy Baja, 2: Baja; 3: Media, 4: Alta, 5: Muy Alta) y es utilizado para el cálculo del riesgo. Para una mayor descripción del cálculo del IVS consultar NATENSON (2015).

TABLA 1
Dimensiones, variables e indicadores el del Índice de Vulnerabilidad Social

Dimensiones	Variables	Indicadores
Condiciones sociales	Educación	1. Analfabetismo
	Salud	2. Mortalidad infantil
	Demografía	3. Población de 0 a 14 años
		4. Población de 65 años o más
Condiciones habitacionales	Vivienda	5. Hacinamiento crítico
	Servicios básicos	6. Falta de acceso a red pública de agua potable
		7. Falta de acceso a desagües cloacales
Condiciones económicas	Trabajo	8. Desocupados
	Educación	9. Nivel educativo de los jefes de hogar
	Familia	10. Hogares sin cónyuge

En este trabajo todos los datos fueron analizados para cada uno de los 13 partidos o unidades administrativas del área de estudio (Figura 1). Para el cálculo del riesgo, el SIMARCC estandarizó todas las variables entre 0 y 1, permitiendo realizar el producto entre la cartografía climática y la de vulnerabilidad social. A partir de este procedimiento, se obtuvieron los resultados del cruce de matrices y se clasificó el nivel de riesgo en cinco categorías: muy bajo (entre 0 y 0,2), bajo (entre 0,2 y 0,4), medio (entre 0,4 u 0,6), alto (entre 0,6 y 0,8) y muy alto (entre 0,8 y 1). Posteriormente, se diseñaron los mapas en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.5) que representaron el riesgo ante el cambio climático considerando la precipitación y la temperatura

media durante los años 2030, 2050 y 2100 bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

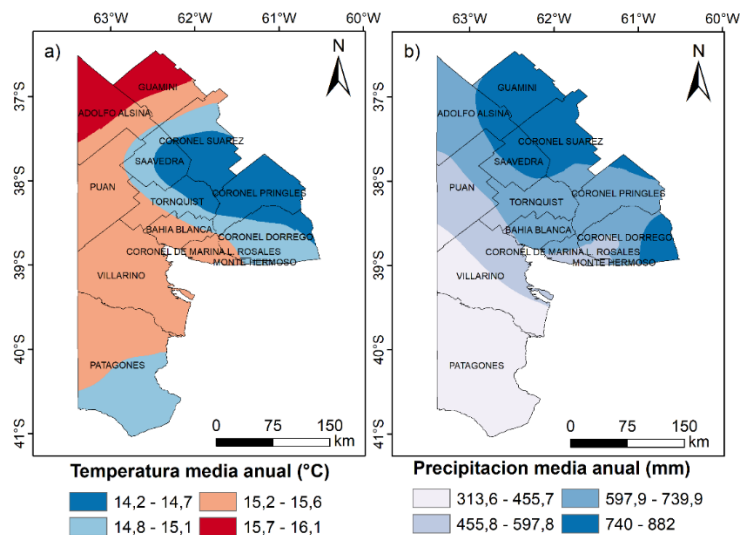
4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DEL CLIMA ACTUAL: COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

La distribución espacial de la temperatura y la precipitación media anual durante el período 1960-2010, se presenta en la Figura 2. La temperatura media anual presentó importantes diferencias espaciales, oscilando entre 14,2 y 16,1 °C (Figura 2a). Las áreas más cálidas se localizan al norte (partidos de Adolfo Alsina y Guaminí), mientras que las de menor temperatura hacia el este (partidos de Coronel Suárez, Coronel Pringles, Saavedra y Tornquist). Además, esta variable decrece en sentido E-W, mostrando un claro efecto de la continentalidad (Figura 2a). Por otro lado, el SW bonaerense evidenció una marcada heterogeneidad espacial de las precipitaciones. Los montos máximos se localizaron al NE de la región (~800 mm) y las áreas de menor precipitación al sur (~350 mm) (Figura 2).

FIGURA 2

Temperatura y precipitación media anual del SW bonaerense durante el período 1960-2010.



Fuente: elaboración propia.

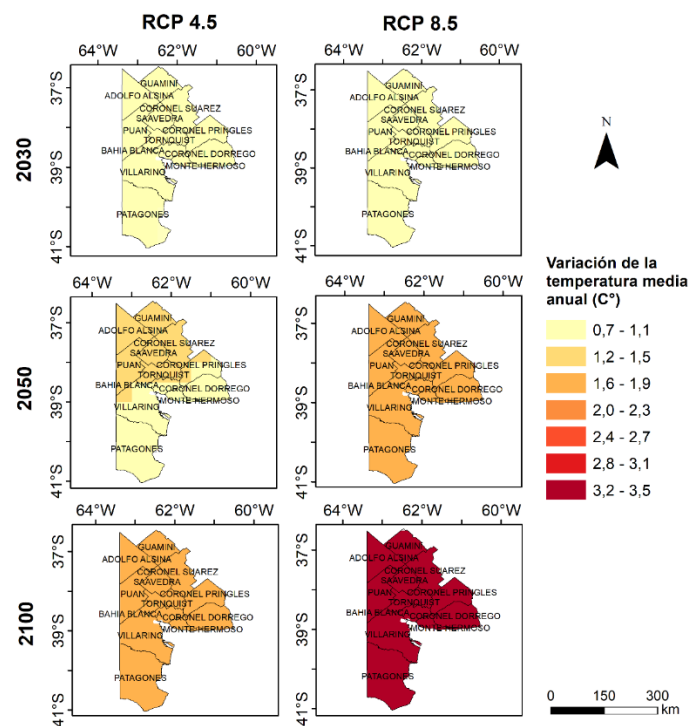
4.2. ANÁLISIS DEL CLIMA FUTURO

La variación de la temperatura media anual en los años 2030, 2050 y 2100 bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 se presenta en la Tabla 1, mientras que su distribución espacial en la Figura 3. Esta variable presentó tendencia positiva en todos los períodos y escenarios analizados y se incrementó de manera gradual hacia el futuro (Tabla 1). Durante el año 2030, la temperatura media anual a escala regional aumentó 0,7°C en el escenario RCP 4.5 y 0,8°C en el escenario RCP 8.5 (Tabla 1). Hacia el 2050, este incremento regional fue mayor, alcanzando 1,1°C en el escenario RCP 4.5 y 1,4 °C en el escenario de mayor concentración de gases de efecto invernadero. En este último, se observó que los partidos del norte y noreste del SW bonaerense (Guaminí, Adolfo Alsina, Coronel Suárez, Puan y Saavedra) fueron los que presentaron los incrementos más importantes, alcanzando 1,5°C. Por último, los cambios de mayor importancia se evidenciaron durante el año 2100, principalmente durante el escenario RCP 8.5. En éste, la temperatura media anual regional aumento 3,4°C y, al igual que en los períodos anteriores, los partidos localizados al norte y noreste del área de estudio fueron los que presentaron los máximos incrementos (3,5°C) (Tabla 1, Figura 3).

TABLA 1
Tasa de variación de la temperatura media anual en el SW bonaerense durante los años 2030, 2050 y 2100 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

	2030		2050		2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
ADOLFO ALSINA	0,7	0,8	1,1	1,5	1,6	3,4
BAHIA BLANCA	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6	3,4
CNEL. ROSALES	0,7	0,8	1,1	1,4	1,5	3,3
CNEL. DORREGO	0,7	0,8	1,1	1,4	1,5	3,3
CNEL. PRINGLES	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6	3,3
CNEL. SUAREZ	0,7	0,8	1,1	1,5	1,6	3,4
GUAMINI	0,7	0,8	1,1	1,5	1,7	3,5
MONTE HERMOSO	0,7	0,8	1,1	1,4	1,5	3,3
PATAGONES	0,7	0,8	1,1	1,4	1,5	3,2
PUAN	0,7	0,8	1,1	1,5	1,6	3,5
SAAVEDRA	0,7	0,8	1,1	1,5	1,6	3,5
TORNQUIST	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6	3,4
VILLARINO	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6	3,3
PROMEDIO REGIONAL	0,7	0,8	1,1	1,4	1,6	3,4

FIGURA 3
Variación espacial de la temperatura media en el SW bonaerense para los años 2030, 2050 y 2100 en los dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5).



Fuente: elaboración propia.

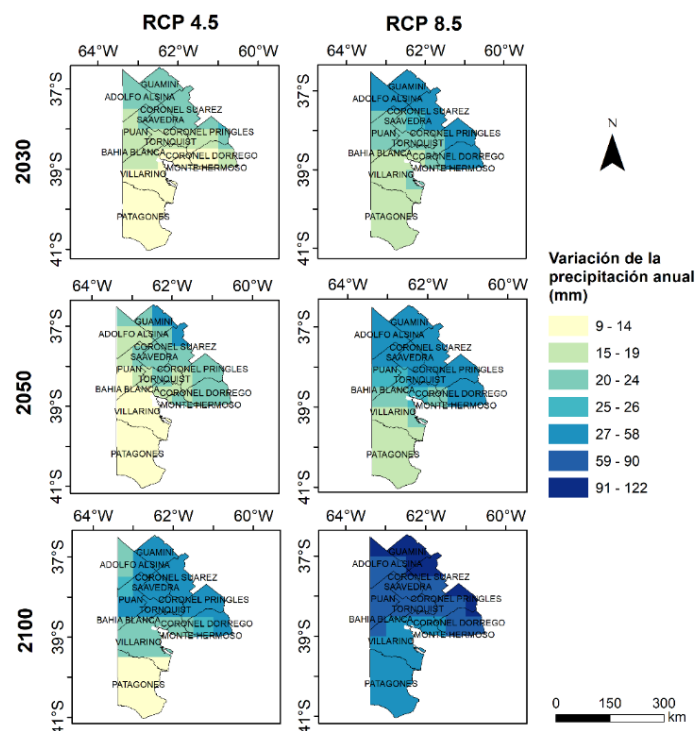
En general, el área de estudio presentó un incremento de la precipitación hacia el futuro y, al igual que en lo hallado con la temperatura, los cambios más importantes ocurrieron en el escenario RCP 8.5 (Tabla 2, Figura 4). Durante los años 2030 y 2050, se registraron pequeñas variaciones. El promedio regional varió de 16 mm (RCP 4.5) a 30,4 mm (RCP 8.5) en el año 2030, mientras que en el 2050 fue 18.3 y 30.4 mm, respectivamente. Hacia el 2100, esta variable presentó a escala regional un fuerte incremento que fluctuó de 24,1 mm en el escenario RCP 4.5 a 70,3 mm en el escenario RCP 8.5. En este último caso, los partidos localizados al norte, como por ejemplo

Guaminí y Coronel Suárez, fueron los que mostraron los incrementos más importantes de todos los períodos analizados, alcanzando los 120 mm (Tabla 2, Figura 4).

TABLA 2
Tasa de variación de la precipitación media anual en el SW bonaerense durante los años 2030, 2050 y 2100 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

	2030		2050		2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
ADOLFO ALSINA	18,5	23,8	16,1	32,1	23,8	77,7
BAHIA BLANCA	14,4	20,5	17,4	25,4	20,5	60,1
CNEL. ROSALES	11,4	21,7	19,1	26,6	21,7	51,2
CNEL. DORREGO	15,0	27,8	19,5	31,1	27,8	70,5
CNEL. PRINGLES	18,3	26,9	20,4	33,3	26,9	81,0
CNEL. SUAREZ	21,5	27,4	23,1	38,9	27,4	92,0
GUAMINI	23,5	34,5	24,9	43,5	34,5	120,0
MONTE HERMOSO	10,1	26,9	20,9	31,2	26,9	60,2
PATAGONES	10,3	15,1	10,6	16,3	13,9	31,8
PUAN	16,9	21,7	16,4	29,8	21,7	69,5
SAAVEDRA	19,6	25,2	19,6	36,4	25,2	80,1
TORNQUIST	17,0	23,5	18,5	30,2	23,5	71,2
VILLARINO	12,4	18,1	11,7	20,8	18,3	45,1
PROMEDIO REGIONAL	16,1	24,1	18,3	30,4	24,1	70,3

FIGURA 4
Variación espacial de la precipitación en el SW bonaerense para los años 2030, 2050 y 2100 en los dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5).



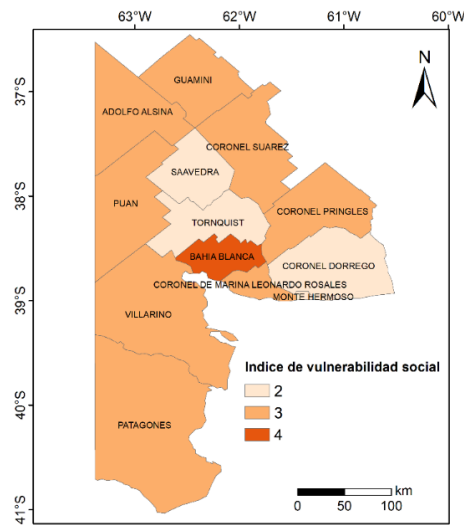
Fuente: elaboración propia.

4.3. COMPORTAMIENTO ESPACIAL DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL

El IVS para el área de estudio osciló entre 2 y 4, siendo el valor más bajo el que representa los sectores más vulnerables, mientras que los valores más altos representan lo opuesto (Figura 5). Por lo tanto, se registró una marcada heterogeneidad espacial en la vulnerabilidad social. El 61,5

% del sudoeste bonaerense presentó un IVS de 3, mientras que el 30,8 % correspondió a la categoría 2. El porcentaje restante se encontró solo en un partido de la región (Bahía Blanca), con un IVS de 4 (Figura 5).

FIGURA 5
Índice de Vulnerabilidad social (IVS) para el SW bonaerense.



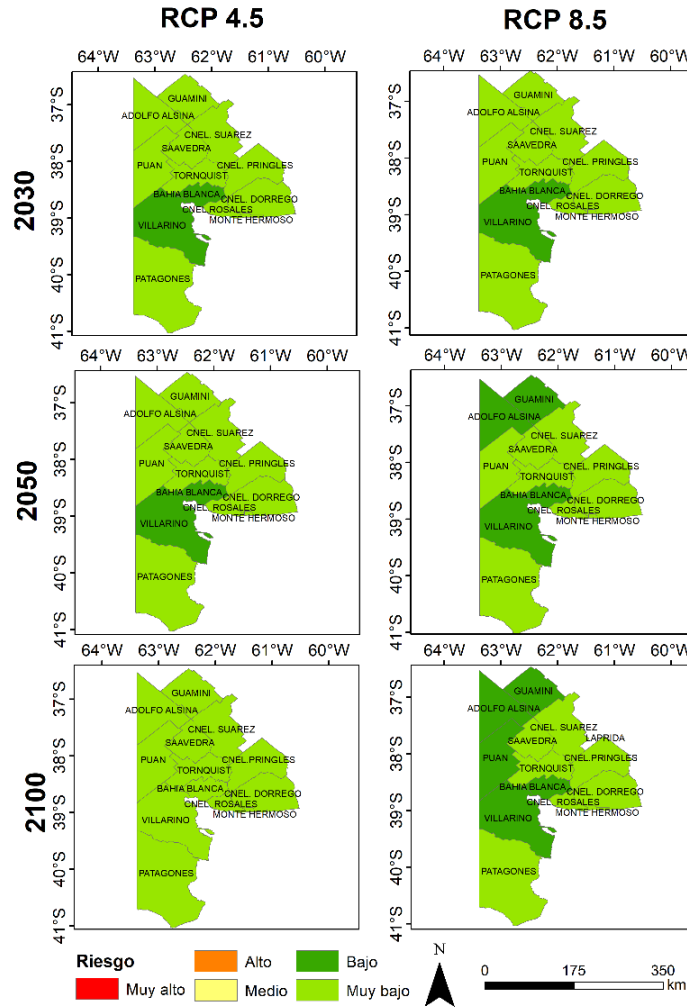
Fuente: elaboración propia.

4.4. ANÁLISIS ESPACIAL DEL RIESGO FUTURO AL CAMBIO CLIMÁTICO

Las figuras 6 y 7 muestran el riesgo futuro al cambio climático en diferentes años y escenarios RCP, considerando la temperatura y precipitación media anual, respectivamente. Estos son el resultado del cruce de matrices entre la información climática (precipitación y temperatura) y el índice de vulnerabilidad social (Figura 2). Las variaciones de la temperatura media futura con respecto al período presente (1960-2010) no generaron un riesgo considerable sobre el área de estudio, dado que durante todos los períodos y escenarios analizados se registraron los menores niveles de riesgo. La categoría muy bajo fue el más representativo, variando entre el 69,2 % (año 2030-RCP 4.5 y 8.5- y año 2050- RCP 8.5) y el 100 % durante el año 2100 bajo el RCP 4.5 (Figura 6). Esta categoría fue detectada en aquellos partidos que presentaron un IVS de 2 y 3, mientras que el nivel bajo fue detectado en aquellos con un IVS de 4 (como por ejemplo, Bahía Blanca). En el año 2100 y el escenario RCP 8.5 se evidenció el cambio más importante ya que algunos partidos del N y NE de la región (Guaminí, Adolfo Alsina y Puan) pasaron de la categoría muy bajo a bajo como consecuencia del mayor incremento térmico (Figura 6). No se detectaron niveles de riesgo medio, alto y muy alto.

FIGURA 6

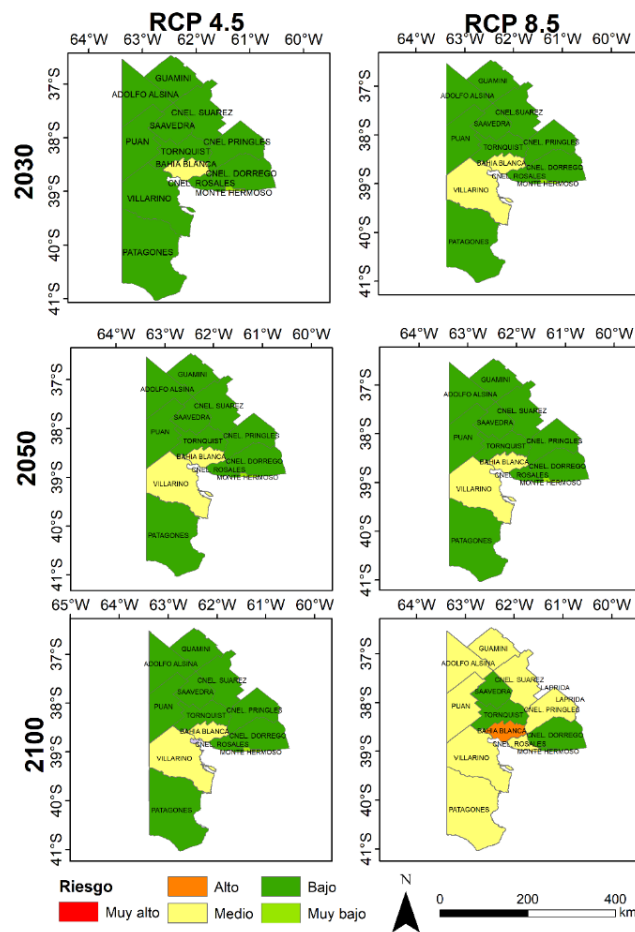
Riesgo al cambio climático en el SW bonaerense considerando la temperatura media durante diferentes años y escenarios RCP.



Fuente: elaboración propia.

Las fluctuaciones en la precipitación media futura ocasionaron diferentes niveles de riesgo, que fueron más importantes hacia fines del período de estudio. Durante los años 2030, 2050 (ambos RCP) y 2100 (RCP 4.5) no se detectaron cambios considerables, dado que el área de estudio estuvo representando en un 84,6 % por la categoría bajo, mientras que el 7,7 % por el nivel bajo y medio, respectivamente (Figura 7). Sin embargo, estos valores se modificaron en el año 2100 bajo el escenario de mayor concentración de GEI, dado que se detectó un incremento de partidos que pasaron de riesgo bajo a medio (69,2 %), siendo la categoría más frecuente (Figura 7). Además, es importante destacar que en este año y escenario considerado se detectó un partido con la categoría de riesgo alto (Bahía Blanca) que no había sido registrado en el resto de los períodos analizados (Figura 7).

FIGURA 7
 Riesgo al cambio climático en el SW bonaerense considerando la precipitación media durante diferentes años y escenarios RCP.



Fuente: elaboración propia.

5. DISCUSIÓN

La precipitación y la temperatura son variables moderadoras del clima, por lo que una pequeña variación puede generar consecuencias sobre la población y el ambiente (URIBE y ZAVALA, 2017). Por lo tanto, en el análisis del riesgo estas variables se consideran una amenaza (REYES RIVERO *et al.*, 2017). El SW bonaerense presentó un marcado incremento térmico y pluviométrico futuro, lo que generó diferentes niveles de riesgo, con mayor importancia en el año 2100 bajo el escenario RCP 8.5. Esta situación se debe a que el RCP 8.5 representa un futuro con mayores emisiones de gases de efecto invernadero, donde se proyecta una alta población con un crecimiento de ingresos relativamente lento, bajas tasas de cambio tecnológico y escasas mejoras en el consumo energético. Esto ocasionará un calentamiento global más intenso que en el escenario RCP 4.5 (BIANCHI *et al.*, 2021). Los resultados coinciden con lo encontrado por diversos autores a escala mundial y nacional, quienes indican que a medida que aumentan los gases de efecto invernadero en la atmósfera la temperatura aumentará (CASTILLO *et al.*, 2018; ROLLA *et al.*, 2018). Además, la tendencia positiva de la precipitación hallada sobre el área de estudio en el escenario de mayor concentración de GEI podría estar asociada al aumento de la temperatura. Según MULLER y GORMAN (2011), el mayor forzamiento radiativo de 8.5 W/m² generará una mayor disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera y, por lo tanto, las precipitaciones tenderán a incrementarse.

En el análisis del riesgo es fundamental considerar de manera integral las variables físico-

naturales y sociales, dado que aquellas comunidades más vulnerables son las que presentan mayor exposición a los impactos negativos del cambio climático (REYES PONTET *et al.*, 2019; MASTRANDREA, 2021). Además, el conocimiento de la situación social de una determinada comunidad permite representar y analizar múltiples dimensiones que se encuentran interrelacionadas y que son explicativas de fenómenos complejos (MASTRANDREA y ANGELES, 2020). En este estudio, se destacó el partido de Bahía Blanca por ser el único en presentar riesgo alto en relación con los cambios pluviométricos en el año 2100 bajo el escenario RCP 8.5. Dicha situación fue producto del cruce de un IVS alto (valor: 4) y de un fuerte incremento de la precipitación (≈ 60 mm) (Figuras 4 y 5). Según NATENZON *et al.* (2015) el aumento de la vulnerabilidad de la población es producto de múltiples factores, principalmente aquellos relacionados con problemas característicos del desarrollo, como por ejemplo procesos de urbanización y de ocupación del territorio, inadecuados sistemas tecnológicos en la construcción de viviendas e infraestructuras y sistemas organizaciones e institucionales poco favorables, entre otros. En el caso del partido de Bahía Blanca, las problemáticas más importantes se localizan en la ciudad homónima, la más extensa de la región (335.190 habitantes, INDEC-2022). En ella, se destacan la dificultad de acceso a la vivienda propia y el terreno, el deterioro del medio construido, la pobreza, la inseguridad social, la vulnerabilidad y la saturación de los servicios básicos de infraestructura, entre otros, que determinan un riesgo mayor (PRIETO *et al.*, 2011). Por otro lado, la categoría de riesgo medio detectado en el resto de los partidos fue producto de un IVS de 3 y precipitaciones espacialmente variables que oscilaron entre 32 mm (Patagones) y 120 mm (Guaminí). Por lo tanto, es necesario considerar aquellas áreas que presentaron riesgo medio y alto, dado que los cambios termo-pluviométricos futuros podrían generar impactos negativos sobre la población y el ambiente. Por ejemplo, el aumento de la precipitación podría ocasionar severos daños económicos y humanos como consecuencia del aumento del caudal de los cursos de agua, principalmente en las áreas con mayor pendiente, como así también en la accesibilidad al agua potable (FERRELLI, 2017; VOLONTÉ, 2018). Además, pequeñas variaciones en los valores medios de precipitación y temperatura podrían ocasionar ligeras reducciones en la productividad de los principales cultivos (ROLLA *et al.*, 2018; BASILE *et al.*, 2022). En ese sentido, su conocimiento es fundamental dado que el área de estudio contribuye al 12 % del total de la producción nacional de trigo, el más importante de la región (MINISTERIO DE AGROINDUSTRIA, 2022).

6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se analizaron los cambios temporales y espaciales del riesgo futuro ante el cambio climático en el sur de la Región Pampeana, considerando dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero en los años 2030, 2050 y 2100. Las variaciones de la temperatura media futura con respecto al período presente (1960-2010) no generaron un riesgo considerable en el área de estudio, ya que durante todos los períodos y escenarios analizados se registraron los niveles más bajos. En cambio, las fluctuaciones en la precipitación media futura causaron diferentes niveles de riesgo, siendo más significativas hacia 2100 en el RCP 8.5. Además, estos cambios pluviométricos tuvieron mayor impacto en las unidades administrativas con alta vulnerabilidad social, indicando un riesgo mayor. Por lo tanto, es crucial para los tomadores de decisión conocer detalladamente el nivel de riesgo futuro ante el cambio climático en los diferentes partidos que conforman el suroeste bonaerense. Estos pueden utilizar esta información como base para la elaboración de planes de manejo del espacio y el diseño de medidas efectivas de adaptación y mitigación al cambio climático, teniendo en cuenta que los eventos extremos húmedos están afectando la región con cada vez mayor frecuencia.

REFERENCIAS

- ALIAGA, V.S., FERRELLI, F., y PICCOLO, M.C. (2017): "Regionalization of climate over the Argentine Pampas". *International Journal of Climatology*, vol. 37, p. 1237-1247.
- ANDRADE, C.W., MONTENEGRO, S.M., MONTENEGRO, A. A., LIMA, J.R.D.S.,

SRINIVASAN, R., y JONES, C.A. (2021): "Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil". *International Journal of Climatology*, 41, p.1045-1061.

BADORA, D., WAWER, R., NIEROBKA, A., KROL-BADZIAK, A., KOZYRA, J., JURGA, B., y NOWOCIEN, E. (2022): "Modelling the hydrology of an upland catchment of Bystra River in 2050 climate using RCP 4.5 and RCP 8.5 emission scenario forecasts". *Agriculture*, 12, n°3, p. 403.

BASILE, S.M.L., TOGNETTI, J.A., GANDINI, M.L. et al. (2022): "Climate change in the temperature and precipitation at two contrasting sites of the Argentinean wheat region". *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 148, p. 237–254.

BIANCHI, A., RUSTICUCCI, M., MENÉNDEZ, C.G., y BARRUCAND, M. (2021): "Agricultural drought risk assessment in Argentina under climate change". *Natural Hazards*, vol. 107, n°1, p. 123-142.

BRENDEL, A. S. (2020): "Tendencias y anomalías termo-pluviométricas actuales y futuras de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana Argentina: un análisis orientado a reducir los impactos socioambientales". *Geográfica Digital*, vol. 17, n° 34, p. 31-46.

BRENDEL, A.S., BOHN, V. Y., y PICCOLO, M.C. (2017): "Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina)". *Estudios Geográficos*, vol. 78, p. 7-29.

BURKE, M., LOBELL, D.B., y GUARINO, L. (2019): "Shifts in African crop climates by 2050, and the implications for crop improvement and genetic resources conservation". *Global Environmental Change*, vol. 58, p. 101956.

CASTILLO, R., MONTERO, R., y RICA, C. (2017): "Proyecciones de cambio climático del sistema ártico basado en el análisis de multi-modelos de los escenarios de emisiones de CO₂". *Revista de Climatología*, vol. 17, p. 29-39.

CHEN, A., HE, X., GUAN, H., y CAI, Y. (2018): "Trends and periodicity of daily temperature and precipitation extremes during 1960–2013 in Hunan Province, central south China". *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 132, n°. 1-2, p. 71-88.

DAI, A., y ZHAO, T. (2017): "Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part I: estimates of historical drought changes." *Climate Change*, vol. 144, p. 519–533.

FAWZY, S., OSMAN, A. I., DORAN, J., y ROONEY, D. W. (2020): "Strategies for mitigation of climate change: a review". *Environmental Chemistry Letters*, p. 1-26.

FERRELLI, F. (2017): "Variabilidad pluviométrica y sus efectos sobre las coberturas del suelo al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina". *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 58, n°1, p. 26-37.

FERRELLI, F., BRENDEL, A.S., PICCOLO, M.C., y PERILLO, G.M.E. (2020): "Tendencia actual y futura de la precipitación en el sur de la Región Pampeana (Argentina)". *Investigaciones Geográficas (UNAM)*, n° 102, e59919.

FOGUESATTO, C.R., ARTUZO, F.D., TALAMINI, E., y MACHADO, J.A.D. (2020): "Understanding the divergences between farmer's perception and meteorological records regarding climate change: a review". *Environment, Development and Sustainability*, vol. 22, n°1, p. 1-16.

GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C., VICENTE-SERRANO, S.M., PEÑA-ANGULO, D., SALINAS, C., TOMAS BURGUERA, M., y BEGUERÍA, S. (2018): "High-resolution spatio-temporal analyses of drought episodes in the western Mediterranean basin (Spanish mainland, Iberian Peninsula)". *Acta Geophysica*, vol. 66, p. 381-392.

HERRERO, A., NATENZON, C., y MIÑO, M. (2018): "Vulnerabilidad social, amenazas y riesgos frente al cambio climático en el Aglomerado Gran Buenos Aires", p. 172.

HUO-PO, C., JIAN-QI, S., y XIAO-LI, C. (2013): "Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario". *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 6, n°1, p. 8-13.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Buenos Aires, Argentina: INDEC. [consulta: 19 de noviembre 2022]. <https://www.indec.gob.ar/>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2021). *Climate Change*

2021: *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. (In press).

LAVELL, A. (1996): *Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación*. En: *Ciudades en Riesgo*, M. A. Fernández (Ed.), La Red, USAID.

MASTRANDREA, A. (2021): “Aportes teórico-conceptuales para el abordaje de la percepción y representaciones sociales del riesgo hídrico”. *Prometeica-Revista de Filosofía y Ciencias*, vol. 23, p.7-24.

MASTRANDREA, A., y ÁNGELES, G. (2020): “Aplicación de un índice de vulnerabilidad social: el caso de la ciudad de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires (Argentina)”. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, vol. 12, n° 16, p. 1-28.

MENAFUOGLIO, A., SECCHI, P., y DALLA, R.M. (2013): “A Universal Kriging predictor for spatially dependent functional data of a Hilbert Space”. *Electronic Journal of Statistics*, vol. 7, p. 2209-2240.

MULLER, C.J., y O’GORMAN, P.A. (2011): “An energetic perspective on the regional response of precipitation to climate change”. *Nature Climate Change*, vol. 1, n°5, p. 266-271.

MUTHUWATTA, L., SOOD, A., MCCARTNEY, M., SILVA, N. S., y OPERE, A. (2018): “Understanding the impacts of climate change in the Tana River Basin, Kenya”. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, vol. 379, p. 37-42.

NATENZON, C. (2015): “Vulnerabilidad social, Amenaza y Riesgo en Argentina. Tercera Comunicación Nacional”. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

PADHIARY, J., DAS, D.M., PATRA, K.C., SAHOO, B.C., y SINGH, K.K. (2018): “Prediction of climate change impact on streamflow and evapotranspiration in Baitarani basin using SWAT model”. *Journal of Agrometeorology*, vol.20, n° 4, p.325.

PRIETO, M.B., SCHROEDER, R., y FORMIGA, N. (2011): “Ciudades intermedias: dinámica y perspectivas: el caso de Bahía Blanca-Argentina”. *Revista Geográfica de América Central*, vol. 2, p. 47.

REYES PONTET, M.D., LONDON, S., y OLDANI, F. (2019): “Cambio climático: Efectos sobre los sectores más vulnerables en los países subdesarrollados”. IX Jornadas de Economía Ecológica; Bariloche-Argentina; p. 174-176.

REYES RIVERO, A.C., MONTILLA PACHECO, A.D.J., CASTILLO GARCIA, P.G., y ZAMBRANO VERA, M. N. (2017): “Amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante eventos naturales. Factores socialmente contruidos”. *Journal of Science and Research*, vol. 2, n° 6, p. 22–28.

ROLLA, A.L., NUÑEZ, M.N., GUEVARA, E.R., MEIRA, S.G., RODRIGUEZ, G.R., y DE ZÁRATE, M. .O. (2018): “Climate impacts on crop yields in Central Argentina. Adaptation strategies.” *Agricultural Systems*, vol. 160, p. 44- 59.

SEO, M., KIM, S., KIM, H., KIM, H., SHIN, J. Y., y HEO, J. H. (2023): “Evaluation of Statistical PMP Considering RCP Climate Change Scenarios in Republic of Korea”. *Water*, Vol. 15, n° 9, p. 1756.

URIBE, I.M., y ZAVALETA, M.V. (2017): “Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero”. *Ingeniería*, vol. 21, n°1, p. 13-30.

VOLONTÉ, A. (2018): “Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas: cuenca del arroyo San Bernardo, sistema de Ventania, Argentina. (Tesis de Doctor en Geografía)”. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

WANG, X., LI, J., LI, C., CHEN, Q., y LI, L. (2019): “Risk management of climate change impacts in China: A review.” *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, p. 117721.

WANG, Z., ZHONG, R., LAI, C., ZENG, Z., LIAN, Y., y BAI, X. (2018): “Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century”. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 249, p. 149-162

XI-LIU, Y.U.E. y QING-XIAN, G.A.O. (2018): “Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions”. *Advances in Climate Change Research*, vol. 9, n° 4, p. 243-252.