

INGENIERÍA HIDRÁULICA, SANITARIA Y AMBIENTAL



APLICACIÓN EN LÍNEA PARA EL MAPEO EN ARGENTINA DE INFORMACIÓN DE LLUVIAS EXTREMAS PARA DISEÑO HIDROLÓGICO

CARLOS GASTÓN CATALINI¹, NICOLÁS FEDERICO GUILLÉN², CARLOS MARCELO GARCÍA², FLAVIA BAZZANO³, MARÍA MAGDALENA BARAGUET²

¹ INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA — CENTRO DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA Y UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA — FACULTAD DE INGENIERÍA GRUPO DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS POBREMENTE AFORADAS AV. ARMADA ARGENTINA 3555, CÓRDOBA, ARGENTINA. E-MAIL: CGCATALINI@HOTMAIL.COM

² INSTITUTO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA (IDIT CONICET/UNC) Y CETA — FCEFYN, AV. VÉLEZ SANSFIELD 1611, CÓRDOBA, ARGENTINA Y CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS, CONICET. E-MAIL: CGARCIA2MJC@GMAIL.COM

³ INSTITUTO DE FÍSICA DEL NOROESTE ARGENTINO (INFINDA CONICET/UNT) FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL TUCUMÁN. TUCUMÁN. ARGENTINA.

RESUMEN

Este trabajo presenta una aplicación en línea que permite visualizar de una manera directa e intuitiva, los mapas de valores de lluvias extremas requeridas para el diseño hidrológico de obras hidráulicas de pequeña y mediana envergadura en la porción continental de la República Argentina. La información que se mapea no pretende ser un reemplazo de las técnicas clásicas de análisis y procesamiento hidrológico sino un valor de referencia a nivel regional. En esta aplicación, se visualizan los valores estimados de Precipitación Máxima Diaria (PMDT) para diferentes periodos de retorno, y el Valor Límite Estimado de Precipitación (VELP) denominado habitualmente como Precipitación Máxima Probable (PMP), empleándose para la estimación de este último valor, una adaptación local generada por los autores de este trabajo a la metodología propuesta por Hershfield, (1961,1965), la cual optimiza la estimación

del factor de frecuencia PMP.

Para generar la información de base se emplearon registros históricos de precipitación diaria máxima anual de 1.564 estaciones, y la técnica de interpolación universal de Kriging fue utilizada para la estimación local, en el área de estudio (República Argentina Continental) la cual presentan diferentes regiones topográficas y climáticas. (Andinas y Subandinas, planicies subtropicales y pampeanas, así también como patagónicas).

Los mapas de PMD y PMP, los cuales se realizaron mediante una grilla de 25 km², muestran una clara tendencia creciente oeste-este, aunque valores de PMD de recurrencia mayor a 50 años, así como el mapa de PMP muestran una cierta uniformidad espacial. Los mapas de varianza de Kriging muestran mayores incertidumbres en regiones donde la densidad espacial de las estaciones pluviométricas no es abundante, principalmente aquellas localizaciones con elevaciones significativas sobre

el nivel del mar, las cuales no fueron incluidos en los mapas.

INTRODUCCIÓN

Los datos de precipitaciones extremas máximas, son requeridos por proyectistas para el diseño de obras de infraestructura hidráulica, control de excedentes, desagües pluviales, planificación del riesgo hidrológico y el ordenamiento territorial. La magnitud del valor seleccionado para este diseño hidrológico depende en gran medida de cuán relevante es la infraestructura que se esté diseñando. En el diseño de estructuras menores (desagües urbanos, alcantarillas, puentes, etc.) se emplean recurrencias de entre 2 y 100 años, siendo los valores extremos de precipitación (Valor Límite Estimado de Precipitación, VLEP o Precipitación Máxima Probable, PMP), empleados para obras de gran envergadura (por ejemplo, Presas y Reservorios) (Chow, et al., 1999). Mientras que el registro hidrológico es específico para cada lugar de medición, los mapas de Precipitación Máxima Diaria asociados a varias recurrencias (PMDT), así como los mapas de PMP, son un aporte significativo para ser empleados de referencia en vastas regiones, donde no existe disponibilidad de información hidrológica. La fuente de información para confeccionar estos mapas proviene de datos locales de PMDT dispersos en una región, por lo cual técnicas de interpolación espacial son requeridas.

Existen en la bibliografía varias aproximaciones respecto al procesamiento, uno de ellos es la generación de grillas interpoladas de precipitación sobre el área de estudio, las cuales tienen un gran potencial cuando las condiciones para el mapeo sean favorables; este es el caso cuando existe una buena distribución de estaciones, tanto más si además de esta información se complementa con otras fuentes de información, como ser observaciones radar (Szolgay, et al., 2009). También, la in-

terpolación espacial para estimaciones en el emplazamiento ha sido ampliamente utilizada para propósitos hidrológicos. Algunos ejemplos son: los mapas de estimación de precipitación asociados a varios periodos de retorno en Cataluña (Casas, et al., 2007; Casas, et al., 2007) y Colombia (González-Álvarez, et al., 2019), el mapeo de los tres parámetros de la distribución GEV en Bélgica (Van de Vyver, 2012), el mapeo de la precipitación mensual anual en Bolivia (Vicente-Serrano, et al., 2015), Brasil (Alves da Silva, et al., 2019) y China (Zhang, et al., 2015). Alternativamente, en los Estados Unidos de Norteamérica (NOAA, 2004), Reino Unido (Prudhomme, 1999) y Australia (Ball, et al., 2019) se ha realizado un análisis de frecuencia regional, en donde las series locales son escaladas utilizando un índice de crecida y cuantiles representativos son estimados para cada región.

En cuanto a la interpolación espacial de variables climáticas diferentes modelos matemáticos son empleados, tal como análisis de superficies tendenciales (Alves da Silva, et al., 2019), polígonos de Thiessen, "spline" (Blanchet, et al., 2019), inverso ponderado de la distancia (Rahman, et al., 2013) y técnicas basadas en regresiones (Vicente-Serrano, et al., 2015). Sin embargo, técnicas geoestadísticas, basadas en la teoría de regionalización de variables (Journel & Huijbregts, 1978), es frecuentemente seleccionado al emplear la correlación espacial entre observaciones vecinas para predecir valores de atributos en localizaciones no muestreadas (Goovaerts, 2000). Kriging es el algoritmo principal en geoestadística, el cual ha sido probado para generar predicciones adecuadas cuando son contrastados contra otras técnicas, lo cual ha sido validado en muchos casos de estudios (Vicente-Serrano, et al., 2003; Mair & Fares, 2011; Keskin, et al., 2015; Boyina, et al., 2017).

Mapas interactivos en línea (denominados web-mapping en inglés) se han extendido

en las décadas pasadas, probablemente por la simplicidad de las consultas las cuales se realizan por medio de cualquier explorador web, sin el empleo ni instalación de ninguna aplicación específica. El término "web-mapping" es utilizado en general para definir tecnologías que surgen de la convalidación de funcionalidades de geoprocetamiento y sistemas de información geográfica (SIG), datos geoespaciales e interfases en línea que proveen a los usuarios la capacidad de almacenar, procesar y visualizar datos utilizando protocolos web. Herramientas de este tipo están disponibles para Bélgica, Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y Australia, entre otros ejemplos. Bélgica tiene disponible herramientas para visualizar precipitaciones extremas con un rango de duraciones que abarca desde los 10 minutos hasta 30 horas, y periodos de retorno desde 2 meses hasta 200 años, basados en modelos de regionalización espacial regresivos (Van de Vyver, 2012). Estados Unidos de Norteamérica, a través de la Administración Nacional de Oceanografía y Atmosfera (NOAA, por sus siglas en inglés), ha desarrollado un atlas así como la documentación oficial para lluvias de diseño (hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/) (NOAA, 2004). También, el Departamento de Ambiente del gobierno de Canadá posee una aplicación en línea, para estimaciones de precipitaciones máximas de corta duración, comprendidas entre los 2 y 100 años de tiempo de retorno (open.canada.ca/data/en/dataset/). Finalmente Australia, publica las relaciones intensidad, duración, recurrencia (i-d-T) encontrándose disponibles en www.boom.gov.au/water/desingRainfalls/idf (Ball, et al., 2019). En Argentina, las estimaciones de las lluvias de diseño están condicionadas por la escasez de registros históricos de precipitaciones, además de la falta de homogeneidad en la distribución espacial de estos, los cuales tienden a concentrarse alrededor de áreas metropolitanas y de

producción agropecuaria. También, por la falta de procesos estandarizados para la estimación de valores de lluvias de diseño, cada proyectista emplea directrices metodológicas estadísticas basadas en criterios variables dependientes de su localización y experiencia personal. Incluso aun, profesionales de la ingeniería comúnmente emplean el método propuesto por Rühle (1966), basado en un mapa en papel de precipitaciones extremas desarrollado hace más de 50 años para todo el territorio Nacional, considerando algunas pocas estaciones pluviométricas disponibles en aquel entonces y no habiendo sido actualizado desde su confección.

Veinticinco años atrás, el grupo de trabajo a cargo de este estudio, comenzó el análisis regional de PMDT para la provincia de Córdoba, el cual fue el primer paso de este estudio (Caamaño Nelli & Dasso, 2003; Catalini, et al., 2011). Con el tiempo se avanzó, en un proceso para la estimación de precipitaciones extremas constando de una aproximación regional la cual fue desarrollada y optimizada para su empleo ingenieril. Estos análisis se extendieron a otras provincias argentinas (Zamanillo, et al., 2008; Olmos, et al., 2010; Bazzano, 2019, entre otros)

En este artículo, el mapeo de PMDT y PMP es presentado para la integralidad del territorio Nacional, extendiendo significativamente los análisis previos y empleando técnicas homogéneas. Concretando un análisis espacial sobre la evolución de los datos, incluyendo diferentes regiones climáticas y topográficas. Los mapas elaborados se encuentran accesibles mediante una interfase en línea amigable y fueron incorporados al Sistema de Gestión de Amenazas Hidrológicas (SGA) del Instituto Nacional del Agua (INA). El INA-SGA, desarrollado en primera instancia, para la evaluación hidrológica ante el riesgo de crecidas repentinas en las Sierras de Córdoba. Incorpora, la herramienta aquí presentada, proveyendo valores de precipita-

ciones extremas (PMDT y PMP) para cada localización del área de estudio, lo cual representa una importante innovación en Argentina.

Las secciones subsiguientes resumirán los datos empleados, la metodología empleada así como los análisis realizados para el desarrollo de esta herramienta.

INFORMACIÓN Y MÉTODOS

Área de estudio

En este trabajo, el área de estudio incluye la totalidad de la superficie del territorio continental de la República Argentina (2.792.600 km²) con una población aproximada de 45.000.000 de habitantes. Las herramientas de Lluvias de Diseño, son altamente demandadas para ser empleadas en infraestructura urbana, la planificación territorial, el control de excedentes y la mitigación de las inundaciones de áreas densamente pobladas. Excepto por la región montañosa occidental, Argentina es, para la mayor parte de su territorio un país de predominancia de llanuras. El territorio puede ser dividido en cuatro grandes áreas topográficas y sus variantes, a saber: la región Andina, hacia el oeste, la planicie Subtropical hacia el norte, las Pampas en el centro y la Patagonia hacia el sur. El clima es subtropical en la región Central, aunque tiende a tropical hacia el norte. En la región norteña Argentina, los veranos son muy calidos y húmedos, con inviernos levemente secos, y sugetos a sequías recurrentes. La región central del país presenta veranos cálidos con eventos de precipitación intensas, con inviernos frios. En los niveles bajos de la atmosfera, cerca de la superficie, la predominancia de vientos circulando a causa del sistema de alta presión del Atlántico Sur, brinda humedad y en ocasiones aire caliente desde el este y el norte (Barros, et al., 2015). La región Andina y otros sistemas montañosos favorecen las lluvias orográficas, produciendo climas húmedos localmente y a

su vez impiden el desarrollo de eventos frontales en otras regiones. Estas últimas foman una amplia zona de climas áridos y semiáridos, que pertenecen a la diagonal árida de América del Sur que atraviesa el país del noroeste al sudeste.

A los efectos de las precipitaciones, el país se puede dividir en dos grandes regiones en función de la masa de aire marítima predominante, las cuales aportan la humedad necesaria para estas. El límite se puede ubicar en el río Colorado; al norte, las precipitaciones se deben a la masa de aire del Atlántico y al sur del Pacífico. En la región influenciada por el régimen del Atlántico, el promedio anual de precipitación varía desde un máximo de 2.300 mm (en la provincia de Misiones) hasta unos 100 mm en las planicies del suroeste. Mientras que en la región influenciada por el régimen del Pacífico, las máximas precipitaciones se registran en la frontera con la República de Chile en la provincia de Río Negro con casi 3.500 mm, hacia el este las precipitaciones disminuyen dejando amplias zonas de la Patagonia extra andina con menos de 200 mm al año, lo descripto puede ser apreciado en la *Figura 1*.

Datos de Lluvias analizados

Los datos empleados en el presente estudio incluyen 1.564 estaciones pluviométricas (en donde el registro diario es realizado entre las 9:00 y las 9:00 del día siguiente) recolectadas por distintas instituciones públicas y privadas, aunque la compliación de la información fue realizada principalmente por Instituciones científicas, tecnológicas y universitarias (*Tabla 1*). Algunos de los datos son de libre disponibilidad tal como los publicados por la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas de la Nación (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (<http://siga2.inta.gob.ar/#/data>) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (<https://geoportail.agroindustria.gob.ar/visor/>).

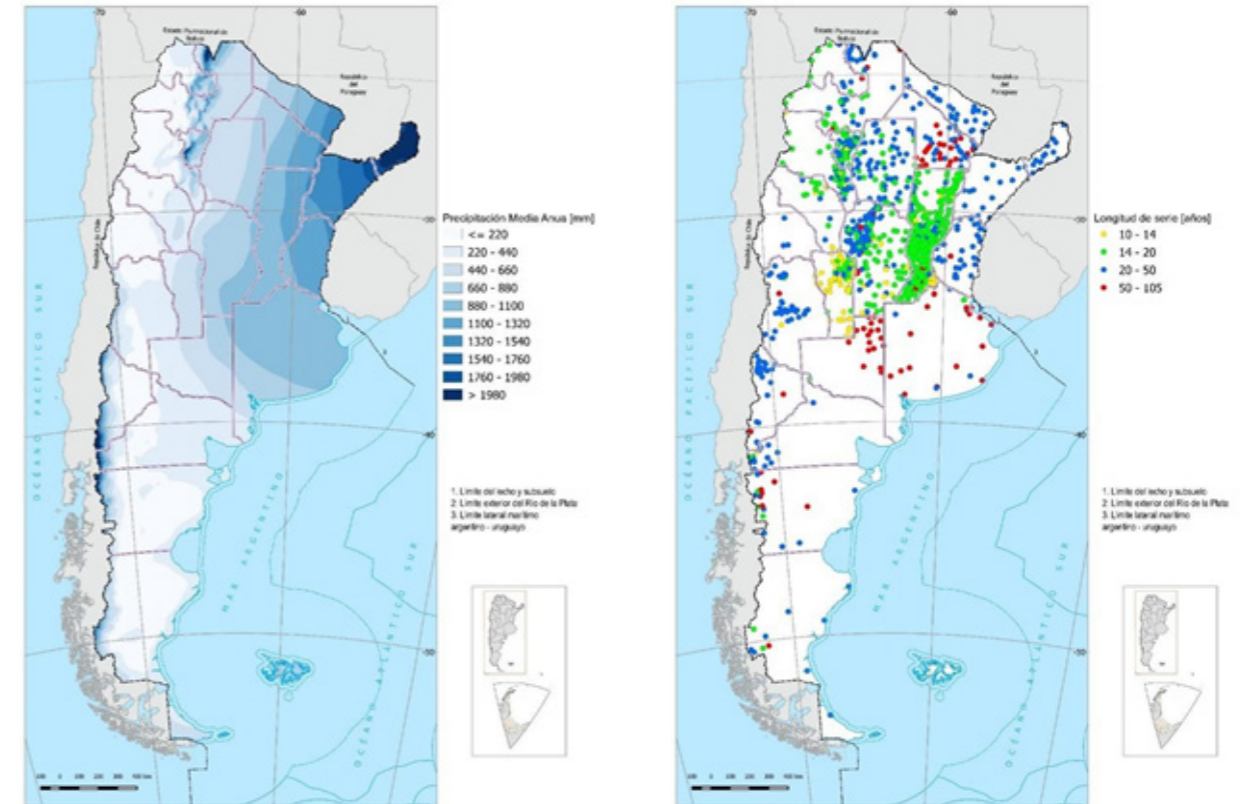


Figura 1. Izquierda: Precipitación media anual [mm], en el territorio Argentino (Bianchi & Cravero, 2010). Derecha: Emplazamiento de estaciones utilizadas, indicando su longitud de serie en escala de colores.

Así como, muchas instituciones relativas al manejo de los recursos hídricos de las distintas provincias que conforman el territorio Nacional, las cuales contribuyeron con registros históricos de precipitación. Además, bases de datos adicionales fueron recolectadas en países limítrofes, como es el caso de la República Oriental del Uruguay, con la finalidad de mejorar las estimaciones en las regiones limítrofes, y obtener mejores resultados en el análisis espacial.

Respecto a la distribución espacial de las estaciones pluviométricas, existe una alta densidad de estaciones en proximidades a las áreas urbanas, sobre todo aquellas zonas de mayor desarrollo agropecuario, como es en Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Tucumán, Entre Ríos, Corrientes, Santiago del Estero, el área central de Salta y Jujuy, el noreste de San Luis, este de Catamarca, Chaco y Formosa. Por otra parte, muy pocas estaciones fueron identificadas

en grandes elevaciones (por encima de los 3.000 m snm), la Puna y Patagonia (*Figura 1, derecha*).

Las series de PMD fueron conformadas para cada localización de estación disponible, para cada año hidrológico de registros, definiendo este al correspondiente entre el 1 de julio hasta el 30 de junio del año siguiente, considerando el ciclo estacional de precipitaciones (donde los mayores registros se dan usualmente entre los meses de octubre y abril). Los registros cubren mayormente el periodo 1940-2020, aunque las series presentan algunos años faltantes (un año completo era descartado en el análisis si existía una interrupción en los datos durante el periodo húmedo). Con respecto a la longitud de serie, un estudio reciente, el cual mediante el empleo series sintéticas (Baraguet, 2018) recomienda disponer al menos 20 años de registros para estimar de manera apropiada recurrencias de 100 años. Siguiendo esta

recomendación, es posible observar en la *Tabla 2*, que más del 50% de la información disponible debería ser descartada, lo cual es demasiado para una adecuada cobertura del territorio Nacional; por lo tanto, basado en estudios previos (Caamaño Nelli & Dasso, 2003; Catalini, et al., 2010 y Casas, et al., 2007) se decidió adoptar como mínimo una longitud de 14 años de registros. Esta decisión genera incertidumbres

en la predicción del orden del 25% para periodos de retorno de 100 años (Guillén, 2014), el cual es un resultado aceptable para ser empleado con fines hidrológicos. De acuerdo a este criterio 1.216 estaciones pluviométricas fueron seleccionadas (77% del total, aunque luego algunas tuvieron que ser descartadas por no superar las pruebas estadísticas). La *Tabla 2* muestra de los lugares seleccionados para cada

Provincia	Institución a cargo de la compilación y análisis	Cantidad de estaciones
Jujuy	Universidad Católica de Salta (UCASAL)	10
La Pampa	Universidad Nacional de Córdoba - FCEFYN / Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)	18
La Rioja	Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultades Regionales Córdoba - La Rioja	33
Entre Ríos	Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Entre Ríos	33
Buenos Aires Santa Cruz Tierra del Fuego	Servicio Meteorológico Nacional	37
Mendoza	Instituto Nacional del Agua - Subgerencia Centro de la Región Andina (INA-CRA)	38
Río Negro Neuquén	Universidad Nacional de Córdoba - FCEFYN / Autoridad Interjurisdiccional de Cuenca (AIC)	43
Catamarca	Universidad Nacional de Córdoba - FCEFYN / Secretaría de Recursos Hídricos de Catamarca	52
Salta	Universidad Católica de Salta (UCASAL)	60
San Luis	Universidad Católica de Córdoba (UCC)	77
Santiago del Estero	Universidad Nacional de Santiago del Estero	78
Tucumán	Universidad Nacional de Tucumán (UNT)	92
Corrientes Misiones Chaco Formosa La Pampa San Juan Chubut	Universidad Nacional de Córdoba - FCEFYN	134
Córdoba	Universidad Católica de Córdoba (UCC) / Instituto Nacional del Agua - Subgerencia Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA)	150
Santa Fe	Universidad Católica de Córdoba (UCC)	340
Emplazamientos con error en su identificación (no utilizados)	Universidad Católica de Córdoba (UCC) / Universidad Nacional de Córdoba - FCEFYN	369

Tabla 1. Institución a cargo de la compilación y análisis de la información disponible en cada Provincia.

Longitud de serie	Número de estaciones	Porcentaje
menos de 14 años	348	22,3%
entre 14 y 19 años	528	33,8%
entre 20 y 50 años	595	38,0%
más de 50 años	93	5,9%

Tabla 2. Análisis de frecuencia de estaciones pluviométricas disponibles en función de su longitud de serie.

clase de longitud de registro seleccionado (menos de 14 años, entre 14 y 19 años, entre 20 y 50 años y más de 50 años), lo cual permite apreciar la importancia de establecer este criterio (14 años de longitud de registro mínima). Dado que el 33,8% de los sitios poseen registros entre 14 y 19 años (528 estaciones pluviométricas), remover esta información significaría una importante pérdida de cobertura espacial de la información lo que muy valiosa a los fines de este estudio.

Análisis de Frecuencia para la PMDT

Las PMD esperadas para 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de tiempo de retorno (PMD2, PMD5, PMD10, PMD25, PMD50 y PMD100) fueron estimadas realizando el análisis de frecuencia para cada sitio seleccionado. Las hipótesis básicas de la estadísticas requeridas para el análisis de frecuencia fueron verificadas en cada emplazamiento (detección de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad) utilizando para ello pruebas estándar, como son prueba de datos atípicos altos y bajos (Chow, 1951); la independencia fue explorada, siguiendo el procedimiento propuesto por Wald & Wolfowitz, 1943; la estacionalidad fue evaluada utilizando una prueba no paramétrica comúnmente utilizada para detectar tendencias de largo plazo en variables hidrológicas (Mann, 1945; Kendall & Stuart, 1967); Finalmente, la prueba de Wilcoxon, (1945) fue empleada para evaluar la homogeneidad de las

series. Luego de estas pruebas, 72 series temporales fueron removidas del grupo de datos, permaneciendo 1.144 series. La *Figura 1* muestra la distribución espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas con sus respectivas longitudes de serie.

La función de distribución de probabilidades Lognormal (FDP) fue ajustada sobre las series seleccionadas para estimar los valores máximos de precipitación para los periodos de retorno comprendido entre los 2 y 100 años (PMDT), así como sus intervalos de confianza asociados a cada predicción. El método de máxima verosimilitud (MLE por sus siglas en inglés) fue utilizado para la estimación de los parámetros de la FDP. Un análisis de sensibilidad a la FDP seleccionada fue realizado abarcando otras 5 FDP usuales en hidrología, a saber: Valores Extremos Generalizados (GEV por sus siglas en inglés) ajuste MLE, Gumbel ajuste MLE; GEV ajuste por el método de los momentos; Gumbel ajuste por el método de los momentos y Log Pearson III ajuste por método de los momentos. Todas las FDP ajustadas verificaron la bondad de ajuste de Chi-cuadrado (Nikulin, 1973) empleando la comparación con la distribución de probabilidades empírica de Weibull. El análisis de sensibilidad mostró que la selección de la FDP Lognormal no causa efectos significativos de la estimación de la PMDT, donde el resultado de la predicción realizado con otras FDP con una significancia del 95% en el inter-

valo de confianza del valor estimado en la mayoría de los casos (97,4% del total de series analizadas). Debido a la magnitud del intervalo de confianza, se afirma que este depende fuertemente de la longitud de serie empleada, demostrando que la incertidumbre es mayor a causa de la longitud de serie, y en menor medida por la FDP empleada en la predicción del valor requerido.

Estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP)

La PMP, junto con otros valores como la Tormenta Máxima Probable (TMP) y la Creciente Máxima Probable (CMP), constituyen Valores Límites Estimados (VLE), usualmente utilizados en el diseño de estructuras para el control de excedentes que por su vulnerabilidad o implicancia demandan una seguridad mayor. El concepto de PMP tiene sus orígenes a fines de la década de 1970, luego de que numerosas presas fallarían en distintos lugares del Mundo, lo que llevó a revisar las normas de diseño y, en particular, el sentido probabilístico del componente pluvial de dimensionamiento (Hershfield, 1981). Muchos organismos dedicados a la seguridad de presas aconsejan hoy explícitamente la PMP, como lámina de tormenta de diseño para grandes obras, cuya rotura involucre riesgos importantes (Sugai & Fill, 1990).

La PMP es definida usualmente como el Valor Límite Estimado de Precipitación (VLEP), por lo que se puede definir como la mayor altura de lámina estimada analíticamente para una duración dada que sea físicamente probable considerando las particularidades de una región geográfica.

• De la definición anterior resaltan dos conceptos claves que dan lugar al surgimiento de dos corrientes de estudio de dicho valor, a saber:

Máxima: surge de la idea de una barrera física insuperable, que resulta de considerar la constancia de la masa atmosférica terrestre, debido a que el ciclo hidrológico

es cerrado, por lo cual, el monto de lluvia tiene en cada sitio un tope resultante de la interacción de factores meteorológicos. De esta manera la PMP es el límite superior racional de la tasa de precipitación, que se justifica climatológicamente (Mc Kay, 1973; Chow, et al., 1999).

Probable: asume a la PMP como un evento de probabilidad finita, aunque sumamente baja, de ser excedido (Hershfield, 1981; Bertoni & Tucci, 1993).

Esta es la vía en la que se fundan las estimaciones estadísticas, que utilizan distribuciones asintóticas, pues admiten la probabilidad tendiente a cero de sobrepasar la PMP. En el presente trabajo se utilizará el método estadístico, ya que en aquellos casos en los cuales se dispone de suficiente información de lluvia, suele existir consenso en qué esta metodología es más adecuada, sobre todo cuando la información climática que se necesita para el método climatológico, como ser el punto de rocío, vientos dominantes y efectos orográficos, es escasa o bien solo se disponen de datos puntuales que invalidan su aplicación regional.

Se debe tener presente que al momento de determinar la PMP serán muy influyentes la calidad de la información, el conocimiento técnico y la exactitud del análisis. A medida que mejora la información, el conocimiento técnico y el análisis, la PMP se aproximara más al valor de umbral, disminuyendo el rango de incertidumbre asociado a su determinación.

Para estimar la PMP, se utilizó la expresión basada en la ecuación general de frecuencia (Chow, 1951), a saber:

$$PMP = \mu_n + \Phi_{PMP} \cdot \sigma_n \quad (1)$$

Expresada en forma dimensional

$$\frac{PMP}{\mu_n} = 1 + \Phi_{PMP} \cdot COV_n \quad (2)$$

Donde μ_n , es la media de una serie temporal precipitación máxima diaria de una localización determinada, σ_n , es el desvío estandar de la misma, COV_n es el coefi-

ciente de variación ($COV_n = \sigma_n / \mu_n$), y Φ_{PMP} es un factor de frecuencia maximizado, que representa el número máximo de desviaciones estándar en las que la PMP supera la media de la serie.

Para calcular Φ_{PMP} se puede aplicar la técnica regional (Hershfield, 1961; 1965), ó continuando con la línea de investigación de la cual forma parte el presente trabajo, se adopta, manteniendo los lineamientos iniciales de la técnica de Hershfield, una nueva alternativa para realizar la estimación del Φ_{PMP} , mediante el empleo de una metodología "sintética" basada en el análisis de series sintéticas generadas de extensa longitud (10 mil años), independizando de esta manera la envolvente resultante de los registros locales disponibles.

Las series sintéticas generadas presentan distribución de frecuencia Lognormal, escogida por su probada representatividad en la pluviometría de la región (Bazzano & Caamaño Nelli, 2015; Bazzano, 2019), en donde se proponen 75 conjuntos de 1000 series de 10 mil años de longitud cada uno condicionando los valores de la media y desvío estándar. Para cada conjunto de datos se toman distintos μ_n y σ_n , considerando combinaciones que generan valores de coeficientes de variación entre 0 y 1. Para cada serie se calcula el valor de Φ_{n-1} .

A posteriori, para cada conjunto de 1000 series (con idénticos parámetros estadísticos) se determina el valor máximo, medio y los correspondientes a los percentiles 95 y 99 de la estimación de Φ_{n-1} . Aquí se utilizó el valor del percentil 99 % de los 1000 valores de Φ_{n-1} al igual que para Φ_{PMP} . Analizando la variación de estos valores del Φ_{PMP} con la media de máximos anuales y el desvío estándar se propone un modelo en función del coeficiente de variación. Se observa que los valores de Φ_{PMP} estimado, tanto la media como los percentiles 95 y 99, presentan una variación suave con el coeficiente de variación (C_v) con un buen ajuste de un modelo exponencial; mien-

tras que en el caso del máximo el grado de ajuste entre las variables graficadas disminuye. En el caso del percentil 99, este buen ajuste se encuentra representado por un coeficiente de determinación múltiple R^2 mayor a 0,99, lo que indica que el modelo exponencial representa adecuadamente dicha variación. La ecuación que ajusta entre el percentil 99 y C_v responde a la expresión analítica:

$$\Phi_{PMP} = 5,23e^{1,96C_v} \quad (3)$$

Involucrar el desvío estándar en el modelo en forma indirecta a través de coeficiente de variación permite trabajar con una variable mucho más robusta, que se presenta en forma más uniforme en el territorio en un rango de valores comprendido entre 0,25 a 0,375 en la mayor parte del sistema de estudio (Figura 2).

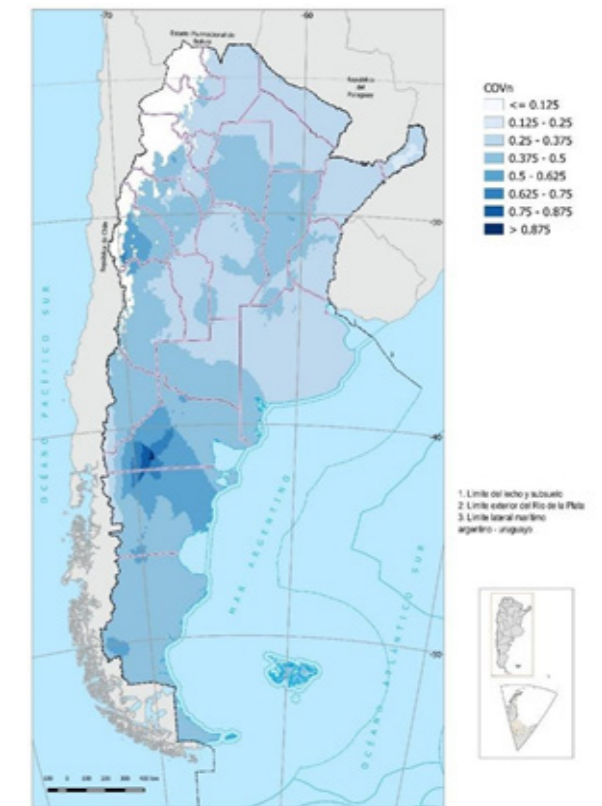


Figura 2. Distribución del coeficiente de variación de los máximos diarios de lluvia anual en la República Argentina

Análisis espacial de PMD y PMP

Una vez, que fueron estimados los valores de PMDT y el valor diario de PMP, la actividad siguiente consiste en el empleo de dicha información local para generar el mapeo en todo el territorio Nacional. Los valores de PMDT y PMP fueron mapeados en una grilla uniforme de 25 km², aplicando para tal fin técnicas geoestadísticas, las cuales requieren el ajuste de un semivariograma adecuado a la información local disponible (definiendo de esta forma la correlación espacial), el cual permitirá obtener una adecuada estimación espacial, de no realizarse dicho análisis la interpolación realizada tendrá poca o ninguna validez (Oliver & Webster, 2015).

Análisis exploratorio de datos

Se realizó un análisis exploratorio con objeto de detectar factores que podrían afectar la confiabilidad del semivariograma para cada PMDT y PMP consideradas en forma individual, en las cuales distintos factores pudieron ser detectados para cada grupo de datos. Este procedimiento se realizó mediante el empleo de aplicativos desarrollados en "R", mediante el empleo de la librería "spdep" (Bivand, R., 2014). A pesar de que, el análisis geoespacial no requiere que los datos se distribuyan siguiendo una distribución normal, los semivariogramas pueden ser inestables cuando los datos se encuentren fuertemente sesgados (Oliver & Webster, 2015). Por lo que, se verificó la suposición de normalidad en todas las variables. El semivariograma también es susceptible a los datos atípicos "outliers", por lo que su detección y eliminación dentro de la distribución media es recomendada (Oliver & Webster, 2015). En este estudio, aquellos registros locales que excedían en $\pm 3\sigma$ fueron removidos. La detección de "inliers", definidos como valores que difieren notoriamente de sus vecinos fueron removidos, también realizado empleando el índice local del Moran (ILM) (Anselin, 1995) el cual cuantifica el grado de similitud y diferencia entre las observaciones y sus registros vecinos. ILM fue determinado para cada localización aplicando la función local de Moran la cual solo considera valores vecinos de acuerdo a una distancia Euclidiana de 150 km. Los inliers seleccionados fueron evaluados a través de la significancia estadística individual siguiendo el procedimiento de límites de Bonferroni (Bland & Altman, 1995) con un nivel general α de 0,05. Para cuantificar la estructura espacial de las variables, se empleó el índice global de Moran (IGM) (Moran, 1948). Un IGM próximo a ± 1 indica alta autocorrelación (positiva o negativa) mientras tanto valores próximos a 0 corresponden a la no existencia de un patrón espacial. El IGM fue calculado con la función moran.mc. Para evaluar la significancia del IGM se realiza una simulación de Monte Carlo, donde el p-valor es calculado a través de una prueba de permutación bootstrap, en donde para las localizaciones se realizan 999 permutaciones obtener la distribución del índice bajo la hipótesis nula de la distribución aleatoria.

Modelado del variograma
El siguiente paso es el modelado del semivariograma para cada grupo de datos. Inicialmente se calcula del semivariograma empírico, el cual, es ajustado siguiendo funciones teóricas, utilizando mínimos cuadrados ponderados (WLS por sus siglas en inglés); exponencial (EXP), esférica (SPH) y gaussiano (GAU) (Oliver & Webster, 2015). Considerando la presencia de tendencias especiales en las variables, tres situaciones diferentes fueron evaluadas, a saber: la no existencia de tendencia, la presencia de tendencias de primer y segundo orden. El modelo más adecuado fue seleccionado por medio de los residuos medios cuadráticos (RMS) y el criterio de información de Akaike (Akaike, 1973).

Interpolación espacial

El algoritmo de Kriging fue seleccionada para concretar la interpolación espacial de valores locales, dado que es un estimador lineal insesgado con mínima varianza espacial. La incertidumbre de la estimación puede ser cuantificada por la varianza de Kriging, acorde al variograma adoptado y a la localización del dato puntual. Conociendo la distribución y magnitud de las incertidumbres es la mayor ventaja respecto a otros modelos matemáticos utilizados en la interpolación espacial, porque esto habilita el análisis de calidad de la estimación, lo cual da soporte a la aceptabilidad de los resultados obtenidos. Existen diferentes opciones de Kriging, aunque solo se empleó en este trabajo la metodología universal de Kriging. Los estudios de antecedentes no encontraron diferencias significativas entre las geoestadísticas más complejas y los métodos Kriging más simples (Vicente-Serrano, et al., 2003; Goovaerts, 2000). Además, correlaciones significativas no fueron encontradas entre las observaciones y su elevación respecto al nivel del mar, que hubiera habilitado la incorporación de esta como variable auxiliar en los mapeos realizados, y se rechazó el suavizado que proporciona el método de Kriging por bloques, dado el interés en representar localmente las variables PMD.

Análisis de validación espacial
Finalmente el análisis espacial es validado usando la validación cruzada, la cual es la metodología más comúnmente empleada para evaluar la bondad de la predicción realizada por medio de Kriging (Blanchet, et al., 2019; Zhang, et al., 2015). La estrategia consiste en excluir una observación de n muestras puntuales y, con las remanentes n-1 valores y el semivariograma modelado por Kriging y su valor. El procedimiento se repite para cada punto, obteniendo un grupo de n errores de la predicción. Si el variograma representa adecuadamente la estructura de la autocorrelación espacial, entonces la predicción residual será menor (Oliver & Webster, 2015). Para evaluar los resultados, una evaluación visual se realiza graficando la predicción versus los valores observados y examinando cuanto se alejan los mismos de la recta de pendiente unitaria. Además, los siguientes estadísticos fueron calculados: error medio (EM), error medio cuadrático (ME), radio de la desviación media cuadrática (MSDR) calculada a partir de los errores cuadráticos y la varianza de Kriging, error medio cuadrático normalizado (NMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson con su significancia estadística (p-valor), determinado utilizando la distribución t para n-2 grados de libertad.

Aplicación en línea de mapeo
La aplicación en línea interactiva de mapeo fue desarrollada, con la finalidad de permitir la libre disponibilidad de los resultados para los valores de diseño hidrológico para la República Argentina. Esta aplicación fue incorporada a una aplicación preexistente diseñada para la gestión de amenazas de origen hidrológico, INA-SGA. Esta aplicación permite la visualización y manipulación de la información. El mayor beneficio de este formato es la libre disponibilidad sin la necesidad del usuario de conocer el empleo de paquete computacional alguno (Boyina, et al., 2017). Para acceder al valor de la lluvia de diseño, el usuario solo requiere conocer las coordenadas geográficas de su interés o simplemente navegar sobre el mapa del territorio Nacional (<http://sgainacirsa.ddns.net/cirsa/mapas/pmpd.xhtml>).

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Análisis exploratorio de datos

La suposición de normalidad fue verificada espacialmente tanto para los datos PMDT y PMP para toda el área bajo estudio, encontrándose similitudes entre la media y la mediana en todos los casos con una diferencia absoluta comprendida entre el 0,3% y 2,0%, tendiendo a decrecer mien-

tras que el periodo de retorno aumenta. Los coeficientes de asimetría son muy bajos para la mayoría de las series, afirmando la suposición de normalidad (Tabla 3). La Tabla 3, resume los estadísticos básicos para cada variable luego de haber removido los "outliers" e "inliers". Se filtraron entre 81 y 122 localizaciones, lo cual representa entre un 7% y 10% del total de información disponible.

Respecto a la detección de outliers, un comportamiento diferenciado se observa para recurrencia menores o iguales a 10 años, en donde la mayoría de los datos atípicos identificados son bajos, mientras que para recurrencias altas ocurre lo contrario. La mayoría de las estaciones emplazadas sobre la región Andina se detectaron datos atípicos, particularmente en aquellas emplazadas sobre los 3.000 m snm. La escases de estaciones pluviométricas sobre dicha elevación no permite un correcto modelado de la variación de los regímenes hidroclimáticos generados por los efectos orográficos. Por esta razón, el

análisis geoestadístico se vio limitado hasta elevaciones de 3.000 m snm para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos. IMG indica una positiva y significativa autocorrelación de todas las variables, demostrando la presencia de una estructura de autocorrelación espacial, inliers y outliers excluidos del modelado del variograma fueron re-incorporados para la interpolación de Kriging.

Selección del modelo de variograma

Considerando la posible presencia de tendencia espacial en la modelación del variograma, tres diferentes situaciones fueron evaluadas, la no existencia de tendencia, tendencia de primer orden y de segundo orden. Por lo tanto, en total 3 funciones teóricas fueron comparadas, nueve variogramas se obtuvieron para cada variable. La Tabla 4, presenta el AIC obtenido para cada situación, y la función seleccionada correspondiente a cada variable. Considerar la existencia de tendencia de segundo orden mostro el mejor ajuste para recu-

rrencias de diseño bajas (de 2 a 25 años), mientras que la contemplar tendencia de primer orden prevaleció para recurrencias mayores (de 50 años a la PMP).

Mapeo de PMD_r y PMP

Los mapas obtenidos mediante la aplicación de Kriging para PMD con recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años así como la PMP son presentados en la Figura 4, en función de mejorar la visualización de la distribución espacial de las variables, los mismos se han clasificado en 8 clases. Los mapas de recurrencia 2 a 10 años muestran un muy pronunciado gradiente de precipitación orientado con dirección suroeste-noreste, con máximos concentrados en la región noreste del país. Una distribución similar de precipitaciones se observa para recurrencias entre 25 y 100 años, aunque se aprecia un desplazamiento desde la región oriental del país hacia la región central, más precisamente sobre las provincias litoraleñas al río Paraná. Este desplazamiento es gradual con el incremento de la recurrencia, aunque es más evidente esta distribución espacial para la PMP, en donde la zona de máximas precipitaciones predichas se encuentra predominantemente en el centro de la planicie Chaco-pampeana, sobre la provincia de Santa Fe, en donde la mayoría de

los valores superan los 615 mm por día. Se observa también una mayor uniformidad de las precipitaciones extremas a medida que la recurrencia aumenta, aunque para 25 años la distribución espacial presenta anomalías más marcadas que para el resto de las recurrencias, pero manteniendo la tendencia antes descrita. Siendo la PMP, la variable analizada que presenta una distribución espacial más marcada para las predicciones extremas. Este comportamiento puede ser explicado en parte, por la uniformidad espacial en la evolución del coeficiente de variación de las series de tiempo de precipitación diaria máxima (Figura 2).

Es de destacar, que la distribución espacial de extremos es muy similar a lo observado en los mapas de precipitación media anual para toda el área de estudio (Figura 1). Barros, et al., (2015) indica que el aumento del gradiente marcado por las isohietas alineadas de norte a sur, se debe al hecho de que el aire húmedo tanto del continente tropical como del Océano Atlántico llega al este de la región con más frecuencia que al oeste. También, altos valores predichos de precipitaciones extremas son esperables en el norte Argentino debido al efecto orográfico de la cordillera de los Andes, lo cual también se aprecia en los Andes Patagónicos. La sequedad

	PMD ₂	PMD ₅	PMD ₁₀	PMD ₂₅	PMD ₅₀	PMD ₁₀₀	PMP
n	1055	1059	1064	1063	1056	1054	1073
Media	82,38	110,22	127,55	149,00	165,30	180,67	492,50
Desv. Est.	21,45	30,09	36,95	45,17	51,27	58,22	215,67
Var(n-1)	460,15	905,13	1365,30	2040,34	2628,75	3389,44	46511,44
Var(n)	459,71	904,27	1364,02	2038,42	2626,26	3386,22	46468,09
Mínimo	25	33	35	40	48	52	66
Máximo	124	180	217	256	283	322	1058
Mediana	84,70	112,00	128,17	149,00	164,25	179,00	447,65
Asimetría	-0,53	-0,28	-0,19	-0,09	0,00	0,07	0,55
Kurtosis	-0,32	-0,45	-0,46	-0,55	-0,60	-0,60	-0,34
ILM	0,55	0,54	0,51	0,49	0,47	0,45	0,28
p-valor	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IGM	0,42	0,45	0,48	0,50	0,53	0,55	0,72
p-valor	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001
Datos filtrados	89	85	80	81	88	90	122
% filtrados	7,8%	7,4%	7,0%	7,1%	7,7%	7,9%	10,2%

Tabla 3. Estadísticos descriptivos luego del análisis exploratorio de datos, para la Precipitación Máxima Diaria (PMD_r) para 2 a 100 años de tiempo de retorno y Precipitación Máxima Probable (PMP).

Función	Tendencia	PMD ₂	PMD ₅	PMD ₁₀	PMD ₂₅	PMD ₅₀	PMD ₁₀₀	PMP
EXP	No	-68,3	-79,2	-68,3	-53,0	-41,9	-33,0	44,3
	1°	-113,7	-96,7	-81,4	-76,3	-74,6	-64,6	18,8
	2°	-138,5	-99,5	-80,7	-80,4	-68,8	-57,4	32,7
SHP	No	-58,3	-82,5	-72,7	-60,2	-52,4	-42,4	32,3
	1°	-53,7	-93,5	-81,2	-66,1	-61,6	22,3	30,2
	2°	-135,7	-103,5	-85,7	-75,6	-65,9	16,7	32,1
GAU	No	-87,8	-66,7	-49,0	-39,2	-35,2	-24,4	40,4
	1°	-51,1	-20,5	-74,0	-61,6	-58,6	-51,9	36,7
	2°	-52,6	-24,2	-64,7	1,5	-62,1	-42,8	36,5

Tabla 4. Criterio de Información de Akaike (AIC), calculado para la Precipitación Máxima Diaria (PMD) con recurrencia asociada y para la Precipitación Máxima Probable. Series ajustadas, exponencial (EXP), esférica (SPH) y gaussiana (GAU). Se resalta aquellas de mínimo AIC

característica de las latitudes medias occidentales también se refleja bien, donde se observan intensidades de precipitación más bajas.

Varianza espacial y validación cruzada

En cuanto a la varianza de predicción, se observa mayor incertidumbre en aquellas áreas con menor cantidad de registros de precipitación: en el centro-oeste del área de estudio, en el sur de Buenos Aires, en la frontera norte con Brasil y en la región Patagónica. Se observa que las varianzas de Kriging aumentan con el período de retorno: entre 7 a 10 mm, lo que representa una incertidumbre de aproximadamente

el 10% en la estimación de precipitación para un período de 10 años, la varianza predominante varía de 200 a 400 mm, lo que representa una similar incertidumbre (aproximadamente del 15%) de la predicción extrema. Es de destacar, que en los mapas de 100 años de recurrencia, existe una expansión de áreas con mayores incertidumbres, alcanzando alrededor del 30% del valor estimado para algunas regiones. Estos casos deben ser considerados para calcular la lluvia de diseño para los proyectos que se emplacen en dichas regiones. A pesar de esto, los resultados obtenidos en este trabajo son aceptables para uso ingenieril, ya que incluso en el

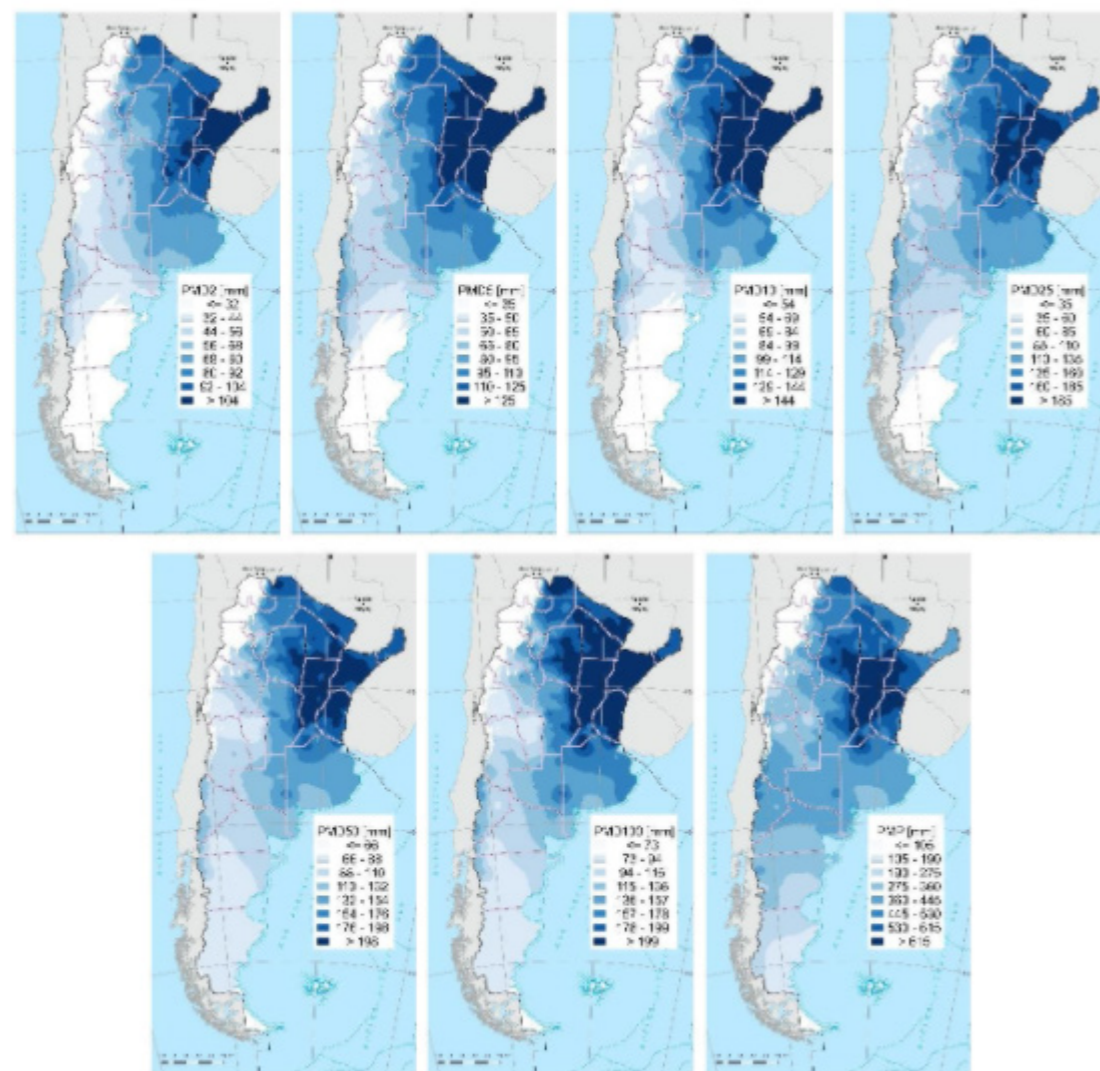


Figura 4. Mapeo de PMDi y PMP para el territorio Nacional.

caso más desfavorable aquí registrado, los errores de predicción espacial representan en promedio el 10% de la estimación, aunque siempre que se disponga de información local de calidad la misma puede ser incorporada y contrastada con las predicciones regionalizadas.

Aplicación de visualización

Una vez que los mapas han sido validados, ellos fueron incorporados para generar un sistema de visualización de los mismos el cual está disponible en <https://sga.ina.gov.ar/cirsa/mapas/pmpd.xhtml>. La disponibilidad de esta información puede ser utilizada principalmente para dos propósitos, a saber: a) para el diseño hidrológico de medidas estructurales y no estructurales requeridas para la mitigación del riesgo hidrológico, y b) para analizar la severidad de eventos observados en los Sistemas de Gestión de Amenazas Hidrológicas. En el primer caso, la herramienta reporta para un emplazamiento dado, ambas variables PMDT y PMP, el cual puede ser empleado en una cuenca de interés para determinar los escurrimientos de diseño o crecidas de proyecto, con los cuales se podrá realizar el diseño hidráulico de la infraestructura que sea requerida. Para el segundo caso, los valores observados por el SGA durante un evento de tormenta severa, puede ser comparado con valores de lluvia de referencia para diferentes tiempos de retorno y la PMP cuantificando con ellos la severidad del evento y su posible amenaza hidrológica para la cuenca en cuestión.

CONCLUSIONES

El mapeo en línea de valores de lluvias extremas para la República Argentina constituye una innovación sin precedentes para el País, la cual puede ser utilizada para diseño hidrológico y evaluación de severidad de eventos extremos de precipitación a lo largo de todo el territorio continental argentino. Los datos de 1.564 estaciones

pluviométricas fueron recolectados y sujetos a un exhaustivo control y análisis de calidad. La recopilación de esta cantidad de información histórica de precipitación representa un verdadero desafío, ya que esta información es generada por muchas organizaciones públicas y privadas (y por propietarios) y no es de acceso libre como en otras regiones del mundo.

Los reportes de información sobre precipitaciones extremas consisten de ambos, PMD para diferentes periodos de retorno y PMP. Valores locales de PMD para diferentes periodos de retorno en el rango de 2 a 100 años fueron estimados usando la FDP Lognormal y se realizó un análisis de sensibilidad para otras 5 funciones.

Los valores de PMP para cada sitio de medición seleccionado fueron estimados utilizando el método regional de Hershfield con un desarrollo del grupo de trabajo en la estimación del factor de frecuencia.

El análisis geoestadístico fue realizado generando mapas con grillas de 25 km² de resolución tanto para los valores de PMDT y PMP, interpolando estimaciones locales utilizando el método universal de Kriging, el cual requiere un modelado previo de la estructura espacial de correlación y ploteo de las variables.

Un análisis sobre la evolución espacial de los valores extremos de precipitación diaria fue realizado en todo el territorio continental argentino, en donde, los registros de láminas de lluvias precipitadas anualmente varían con máximos superiores a los 2.000 mm a menos de 100 mm en otras regiones. Este análisis muestra que las lluvias extremas son más espacialmente más uniformes a medida que el periodo de retorno aumenta, siendo la PMP, la variable analizada que posee una mayor uniformidad espacial.

Los mapas en línea tanto de PMDT y PMP brindan un acceso simple y directo a los resultados de este estudio, pudiendo obtener predicciones de las lluvias de diseño en regiones carentes de registro, con un

grado de incertidumbre aceptable para fines ingenieriles usuales.

La disponibilidad de mapas de precipitación extrema de alta calidad y actualizados es fundamental para el manejo hidrológico, especialmente en áreas donde se asientan poblaciones de alta vulnerabilidad, ya que permite desarrollar las acciones necesarias para mitigar el impacto de las amenazas hidrológicas, a través de una estimación confiable de magnitud de la precipitación esperada en eventos futuros según la relevancia del proyecto.

Se recomienda seguir trabajando en estudios futuros con el fin de incorporar nueva información de países vecinos que permita una mejor caracterización bajo las condiciones de los límites.

Los mapas generados deben actualizarse periódicamente (se recomienda un período de 5 años), incluidos los nuevos sitios y el actualizado de registros existentes.

Por último, la información que se mapea no pretende ser un reemplazo de las técnicas clásicas de análisis y procesamiento hidrológico sino un valor de referencia a nivel regional.

BIBLIOGRAFÍA

- AKAIKE, H., 1973. INFORMATION THEORY AND AN EXTENSION OF THE MAXIMUM LIKELIHOOD PRINCIPLE. 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION THEORY AND CONTROL, p. 267.
- ALVES DA SILVA, A., STOSIC, B., MENEZES, S. & SINGH, V., 2019. COMPARISON OF INTERPOLATION METHODS FOR SPATIAL DISTRIBUTION OF MONTHLY PRECIPITATION IN THE STATE OF PERNAMBUCO, BRAZIL. JOURNAL OF HYDROLOGY ENGINEERING, 24(3).
- ANSELIN, L., 1995. LOCAL INDICATORS OF SPATIAL ASSOCIATION - LISA. GEOGRAPHICAL ANALYSIS, 27(2), pp. 93-115.
- BALL, J. ET AL., 2019. AUSTRALIAN RAINFALL AND RUNOFF - A GUIDE TO FLOOD ESTIMATION. S.L.:COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (GEOSCIENCE AUSTRALIA).
- BARAGUET, M., 2018. EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PREDICCIÓN DE LLUVIAS PARA DISEÑO EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA. CÓRDOBA: TESIS DE MAESTRIA MENCIÓN EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA - UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA.
- BARROS, V. ET AL., 2015. CLIMATE CHANGE IN ARGENTINA: TRENDS, PROJECTIONS, IMPACTS AND ADAPTATION. WIREs CLIMATE CHANGE, 6(2), pp. 151-169.
- BAZZANO, F., 2019. PREDICCIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS PARA DISEÑO HIDROLÓGICO. DESARROLLO EXPERIMENTAL EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN. TESIS DOCTORAL ED. SAN MIGUEL DE TUCUMÁN: UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMAN.
- BAZZANO, F. & CAAMAÑO NELLI, G., 2015. PREDICCIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS EN TUCUMÁN CON EL MODELO DIT. PARANÁ, S.N.
- BERTONI, J. & TUCCI, C., 1993. CAPITULO 5. PRECIPITAÇÃO.. IN: C. TUCCI, ED. HIDROLOGIA, CIÊNCIA E APLICAÇÃO.. PRIMERA ED. SAO PAULO: EDITORA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO. UFRGS, pp. 177-231.
- BIANCHI, A. & CRAVERO, S., 2010. ATLAS CLIMÁTICO DIGITAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. PRIMERA ED. SALTA: INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA).
- BIVAND, R., 2014. SPDEP:SPATIAL DEPENDENCE: WEIGHTING SCHEMES, STATISTICS AND MODELS. R PACKAGE VERSION 0.5-75/r559. [ONLINE]
- AVAILABLE AT: [HTTP://R-FORGE.R-PROJECT.ORG/PROJECTS/SPDEP](http://R-FORGE.R-PROJECT.ORG/PROJECTS/SPDEP)
- BLANCHET, J., PAQUET, E., AYAR, P. & PENOT, D., 2019. MAPPING RAINFALL HAZARD BASED ON RAIN GAUGE DATA: AN OBJETIVE CROSS-VALIDATION FRAMEWORK FOR MODEL SELECTION. HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES (HESS), 23(2), pp. 829 - 849.
- BLAND, J. & ALTMAN, D., 1995. MULTIPLE SIGNIFICANCE TESTS: THE BONFERRONI METHOD.. BJM, 310(6973), p. 170.
- BOYINA, R., CATTS, G., SMITH, S. & DEVINE, H., 2017. HYDROLOGIC WEB-MAPPING APPLICATION OF HOFMAN FOREST - GIS APPROACH: CASE STUDY. JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING, 22(5), pp. 1 - 11.
- CAAMAÑO NELLI, G. & DASSO, C., 2003. LLUVIAS DE DISEÑO: CONCEPTOS, TÉCNICAS Y EXPERIENCIAS. PRIMERA ED. CÓRDOBA(-CÓRDOBA): UNIVERSITAS.
- CASAS, M. ET AL., 2007. ANALYSIS AND OBJETIVE MAPPING OF EXTREME DAILY. INTERNATIONAL JOURNAL CLIMATOLOGY, ISSUE 27, pp. 399 - 409.
- CATALINI, C., CAAMAÑO NELLI, G. & DASSO, C., 2011. DESA-

- ROLLO Y APLICACIONES SOBRE LLUVIAS DE DISEÑO EN ARGENTINA.. PRIMERA ED. SAARBRÜCKEN: EDITORIAL ACADÉMICA ESPAÑOLA.
- CATALINI, C., MAIDAH, A., GARCÍA, C. & CAAMAÑO NELLI, G., 2010. MAPAS DIGITALES DE ISOHIETAS DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS PARA LA PROVINCIA DE CÓRDOBA. AZUL, IHLL.
- CHOW, V., 1951. A GENERAL FORMULA FOR HYDROLOGIC FREQUENCY ANALYSIS. EOS TRANS AGU, 32(2), pp. 231-237.
- CHOW, V., MAIDMENT, D. & MAYS, L., 1999. HIDROLOGÍA APLICADA. SANTA FE DE BOGOTA: MC GRAW-HILL BOOK COMPANY.
- GONZÁLEZ-ÁLVAREZ, A. ET AL., 2019. ISOHYETAL MAPS OF DAILY MAXIMUM RAINFALL FOR DIFFERENT RETURN PERIODS FOR THE COLOMBIAN CARIBBEAN REGION. WATER, ISSUE 11Ç, p. 258.
- GOOVAERTS, P., 2000. GEOSTATISTICAL APPROACHES FOR INCORPORATING ELEVATION INTO THE SPATIAL INTERPOLATION OF RAINFALL. JOURNAL OF HYDROLOGY, 228(1 - 2), pp. 113 - 129.
- GUILLÉN, N., 2014. ESTUDIOS AVANZADOS PARA EL DISEÑO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE INFRAESTRUCTURA HÍDRICA, CÓRDOBA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA.
- HERSHFIELD, D., 1961A. ESTIMATING THE PROBABLE MAXIMUM PRECIPITATION. PROCEEDINGS AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JOURNAL OF HYDRAULIC DIVISION 87 (HY5), pp. 99-106.
- HERSHFIELD, D., 1965. METHOD FOR ESTIMATING PROBABLE MAXIMUM PRECIPITATION. JOURNAL AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 57(8), pp. 965-972.
- HERSHFIELD, D., 1981. THE MAGNITUDE OF THE HYDROLOGICAL FREQUENCY FACTOR IN MAXIMUM RAINFALL ESTIMATION. HYDROLOGICAL SCIENCES BULLETIN, 26(2), pp. 171-177.
- JOURNEL, A. & HUIJBREGTS, C., 1978. MINING GEOSTATISTICS. 1 ED. S.L.:ACADEMIC PRESS.
- KENDALL, M. & STUART, A., 1967. THE ADVANCE THEORY OF STATISTICS. SEGUNDA ED. NEW YORK: HAFNER.
- KESKIN, M., DOGRU, A., BALCIK, F. & GOKSEL, C., 2015. COMPARING SPATIAL INTERPOLATION METHODS FOR MAPPING METEOROLOGICAL DATA IN TURKEY. ENERGY SYSTEMS AND MANAGEMENT, pp. 32 - 42.
- MAIR, A. & FARES, A., 2011. COMPARISON OF RAINFALL INTERPOLATION METHODS IN A MOUNTAINOUS REGION OF A TROPICAL ISLAND. JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING, 16(4), pp. 371 - 383.
- MANN, H., 1945. NON PARAMETRIC TEST AGAINST TREND. ECONOMETRICA, 13(3), pp. 245-259.
- MC KAY, G., 1973. SECTION II PRECIPITATION. IN: HANDBOOK OF THE PRINCIPLES OF HYDROLOGY. NEW YORK: NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. WATER INFORMATION CENTER.
- MORAN, P., 1948. THE INTERPRETATION OF STATISTICAL MAPS. JOURNAL OF THE ROYAL STATISTICAL SOCIETY. SERIES B (METHODOLOGICAL), 10(2), pp. 243-251.
- NIKULIN, M. S., 1973. CHI-SQUARE TEST FOR CONTINUOUS DISTRIBUTIONS WITH SCALE AND SHIFT. THEORY OF PROBABILITY AND ITS APPLICATIONS, 18(3), pp. 559-568.
- NOAA, 2004. ATLAS 14: PRECIPITATION-FREQUENCY ATLAS OF THE UNITED STATES.. S.L.:NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NATIONAL WEATHER SERVICES).
- OLIVER, M. A. & WEBSTER, R., 2015. BASIC STEPS IN GEOSTATISTICS: THE VARIOGRAM AND KRIGING. NEW YORK, DORDRECHT,

LONDON: SPRINGERBRIEFS.

OLMOS, L., IBAÑEZ, J. & FARIAS, H., 2010. ESTUDIO REGIONAL DE LAS LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS. APLICACIÓN A LA LLANURA CHAQUEÑA ARGENTINA. PUNTA DEL ESTE, CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA.

PRUDHOMME, C., 1999. MAPPING A STATISTIC OF EXTREME RAINFALL IN A MOUNTAINOUS REGION. PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH, PART B: HYDROLOGY, OCEANS AND ATMOSPHERE, 24(1 - 2), pp. 79 - 84.

RAHMAN, M., SARKAR, S., NAJAFI, M. & RAI, R., 2013. REGIONAL EXTREME RAINFALL MAPPING FOR BANGLADESH USING L-MOMENT TECHNIQUE. JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING, 18(5), pp. 603 - 615.

RÜHLE, F., 1966. DETERMINACIÓN DEL DERRAME MÁXIMO SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS IMBRÍFERAS. LA INGENIERÍA, VOLUME 987.

SUGAI, M. & FILL, H., 1990. TEMPO DE RECORRÊNCIA ASSOCIADO À PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL NA REGIÃO SUL DO BRASIL. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA CADERNO DE RECURSOS HIDRICOS, 8(1), p. 110.

SZOLGAY, J., PARAJKA, J., KOHNOVÁ, S. & HLA, K., 2009. COMPARISON OF MAPPING APPROACHES OF DESIGN ANNUAL MAXIMUM DAILY PRECIPITATION. ATMOSPHERIC RESEARCH, ISSUE 92, pp. 289-307.

VAN DE VYVER, H., 2012. SPATIAL REGRESSION MODELS FOR EXTREME PRECIPITATION IN BELGIUM.. WATER RESOUR. RES, 48(9), pp. 1-17.

VICENTE-SERRANO, S. ET AL., 2015. AVERAGE MONTHLY AND ANNUAL CLIMATE MAPS FOR BOLIVIA. JOURNAL OF MAPS, 12(2), pp. 1 - 16.

VICENTE-SERRANO, S., SAZ-SANCHEZ, M. & CUADRAT, J., 2003. COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERPOLATION METHODS IN THE MIDDLE EBRO VALLEY (SPAIN): APPLICATION TO ANNUAL PRECIPITATION AND TEMPERATURE. CLIMATE RESEARCH, 24(2), pp. 161 - 180.

WALD, A. & WOLFOWITZ, J., 1943. AN EXACT TEST FOR RANDOMNESS IN THE NON-PARAMETRIC CASE BASED ON SERIAL CORRELATION. THE ANNALS OF MATHEMATICAL STATISTICS, 14(4), pp. 378-388.

WILCOXON, F., 1945. INDIVIDUAL COMPARISONS BY RANKING METHODS. BIOMETRIC BULLETIN, VOLUME 1, pp. 80 - 83.

ZAMANILLO, E. ET AL., 2008. TORMENTAS DE DISEÑO PARA LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS. CONCORDIA: FACULTAD REGIONAL CONCORDIA. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL.

ZHANG, F., ZHONG, S., SUN, C. & HUANG, Q., 2015. SPATIAL ESTIMATION OF MEAN ANNUAL PRECIPITATION (1951-2012) IN MAINLAND CHINA BASED ON COLLABORATIVE KRIGING INTERPOLATION. GEO-INFORMATICS IN RESOURCE MANAGEMENT AND SUSTAINABLE ECOSYSTEM. GRMSE 2015. COMMUNICATIONS IN COMPUTER AND INFORMATION SCIENCE, VOLUME 569, pp. 663 - 672.