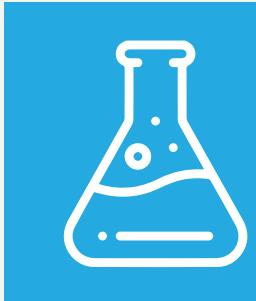
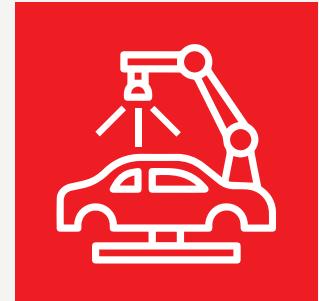


Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería

- | Enseñanza de la Ingeniería-CAEDI
- | Gestión de la Educación en Ingeniería
- | Agrimensura, Geodesia y Ciencias de la tierra y el mar
- | Biotecnología y Bioingeniería
- | Materiales y Nanotecnología aplicada a los materiales
- | Desarrollo Tecnológico Social, Vinculación Universidad, Empresa y Estado
- | Ejercicio Profesional de la Ingeniería, Empresas y Servicios
- | Ferroviaria, Automotriz, Naval y Transporte
- | Alimentos y Agroindustria
- | Agronomía y Forestal
- | Energía, Energías Limpias, Energías Renovables y Eficiencia Energética
- | Ingeniería Sostenible, Gestión Ambiental y Cambio Climático
- | Innovación y Emprendedorismo en Ingeniería
- | Mujeres en Ingeniería y Cambio Social
- | Obras y Proyectos de Ingeniería, Infraestructura y Conservación del Patrimonio
- | Tecnología de la Información y Comunicación



Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería : edición 2022 / José Basterra...

[et al.] ; contribuciones de Carolina Orcola ; compilación de Martina Perduca ; prólogo de Nestor Braidot ; Jose Basterra. - 1a ed compendiada. - Corrientes : Universidad de la Cuenca del Plata. Secretaría de Políticas del Conocimiento, 2023.

Libro digital, PDF

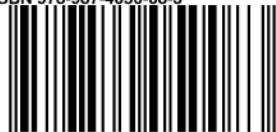
Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4050-08-3

1. Ingeniería. 2. Educación. I. Basterra, José, prolog. II. Orcola, Carolina, colab. III. Perduca, Martina, comp. IV. Braidot, Nestor, prolog.

CDD 620.007

ISBN 978-987-4050-08-3



9 789874 050083



Análisis de precipitaciones extremas en el área metropolitana del Gran Resistencia

Depetris, Carlos A.^a; Pilar, Jorge V.^{a,b}; Rohrmann, Hugo R.^a; Gómez, Marcelo J. M.^a

^a Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería-UNNE

^b Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Misiones (Argentina)

carlosdepetris@gmail.com

Resumen

En el año 2019 durante los meses de enero y abril, el Área Metropolitana del Gran Resistencia, conformada por las localidades de Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana, ha soportado precipitaciones extremas, cuyas consecuencias fueron inundaciones en numerosos barrios del casco céntrico y de las áreas periféricas, con el consecuente deterioro de la infraestructura urbana y problemas ambientales como la diseminación incontrolada de basura con un colapso del sistema de conducción de líquidos cloacales.

La ocurrencia de estos eventos extremos diarios, medidos en la Estación Campus Resistencia de la UNNE, han sido producto de un calentamiento extraordinario de la atmósfera en la región central de Sudamérica desde abril de 2018, un debilitamiento de los sistemas frontales de la región antártica y un sostenimiento del calentamiento superficial del Océano Atlántico, creándose un corredor libre de concentración de humedad en la región.

Dadas las condiciones críticas que para la población y la infraestructura se generan en el AMGR ante la ocurrencia de los eventos mencionados, se consideró necesario realizar una estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para una duración diaria aplicando el criterio estadístico de Hershfield, lo que arrojó un valor para el Factor de Frecuencia $\Phi = 5$, resultando como consecuencia una PMP diaria de 302.2 mm, monto que debería ser tenido en cuenta para llevar adelante el diseño de los planes de contingencia a incluir en un Plan Director de Drenaje Urbano que aún falta desarrollar para esta región.

Abstract

In 2019, the Great Resistencia Metropolitan Area, made up of the towns of Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas and Fontana, has endured extreme rainfall during the months of January and April, the consequences of which were floods in numerous neighborhoods, both in the central area and in peripheral areas, with the consequent deterioration of urban infrastructure and environmental problems derived from the uncontrolled dissemination of garbage with a collapse of the sewage system.

The occurrence of these extreme daily events, measured at the Campus Resistencia Station of the UNNE, have been the product of an extraordinary warming of the atmosphere in the central region from South America since April 2018, a weakening of the frontal systems of the Antarctic region and a maintenance of the surface warming of the Atlantic Ocean, which created a corridor free of moisture concentration in the region.

Given the critical conditions that are generated in the AMGR for the population and infrastructure in the event of the aforementioned events, it was considered necessary to estimate the Probable Maximum Precipitation (PMP) for a daily duration by applying the Hershfield statistical criterion, which yielded a value for the Frequency Factor $\Phi = 5$, resulting in a daily PMP of 302.2 mm, an amount that should be taken into account to carry out the design of contingency plans to include in a Drainage Master Plan Urban that still needs to be developed for this region.

Palabras claves: Lluvias intensas, precipitación máxima probable, Área Metropolitana del Gran Resistencia.

INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR) constituye el conglomerado urbano más poblado de todo el Nordeste Argentino, estimándose actualmente una población del orden de 413.500 habitantes si se considera el mantenimiento de la última tasa intercensal [1]. La mayor parte del área se sitúa en la planicie de inundación del río Paraná y está atravesada por el cauce del río Negro en el sector norte y los vestigios geomorfológicos del riacho Arazá en la zona sur, lo cual determina una situación de riesgo hídrico que se trata de controlar mediante la polderización del ejido urbano con terraplenes de defensa, complementados con compuertas y estaciones de bombeo. Tales obras de control, ejecutadas entre los años '90 y la primera década del presente siglo, condicionan el sistema de desagües pluviales del AMGR, lo que se suma a una muy baja pendiente del sistema natural, por lo que trasladar excedentes hídricos dentro del área tiene un alto costo para atender la demanda en tiempos compatibles con las necesidades de una gran ciudad. Ante la no concreción de un Plan Director de Drenaje Pluvial para la totalidad del AMGR, cada evento crítico genera incertidumbre respecto a los procedimientos para atender los múltiples problemas que se van sucediendo a medida que se desarrolla la tormenta. Aparece entonces un claro problema de la gestión de la inundación como medida no estructural, la cual debería estar contemplada en el mencionado plan [2].

En el curso del año 2019, el AMGR, conformada por las localidades de Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana (Figura 1), ha experimentado la ocurrencia de precipitaciones extremas durante los meses de enero y abril, cuyas consecuencias derivaron en inundaciones en múltiples sectores del casco céntrico y de los barrios periféricos. El resultado de tales eventos confluyó en graves perjuicios materiales al mobiliario y viviendas, sumado a las ingentes dificultades provocadas al desplazamiento de personas y vehículos durante varias horas, y de días en algunos sectores más críticos, como asimismo el deterioro de la infraestructura urbana y los problemas ambientales provocados por la diseminación incontrolada de basura con un colapso del sistema de conducción de líquidos cloacales. Los principales eventos de precipitación ocurrieron los días 8/9 de enero, con 237 mm y el día 20 de abril, con 174 mm, según los registros de la Estación Meteorológica que opera el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE en el Campus Resistencia. A su vez el 11 de marzo de 2017 ocurrió un evento que totalizó 198 mm, lo que muestra que en un período de 3 años han ocurrido extremos

diarios de singular gravedad para el área urbana involucrada. Dado que los tres eventos tuvieron una duración que no superó las 10 horas y que las lluvias utilizadas para el diseño hidráulico en el AMGR, con recurrencias de 10 años para dicha duración están en el orden de los 160 mm, surge el interrogante de cuál es la verdadera probabilidad de ocurrencia de tales eventos críticos, lo que obligaría a un replanteo de las tormentas de diseño a utilizar en los sistemas de desagüe de las áreas urbanas densamente pobladas de la región [2]. Desde una óptica estadística, la ocurrencia de un evento crítico de alta recurrencia provocará la disminución de esa recurrencia; lo que, dicho en otras palabras, si un evento crítico ocurrió, aumenta la probabilidad de que se repita, lo cual puede demostrarse con algunos cálculos elementales.

Por otra parte, existe una marcada preocupación por la aparición de eventos cada vez más intensos y de mayor volumen, como lo demuestra la tendencia de los máximos anuales de precipitación diaria del registro correspondiente a los últimos 60 años (1960-2019) para Resistencia, lo que conduciría a tener en cuenta el concepto de Precipitación Máxima Probable (PMP), ya utilizado regionalmente en el estudio de la Obra de Control del Río Negro en Laguna Blanca [3] y que permitiría conjeturar acerca de la variabilidad climática [4].

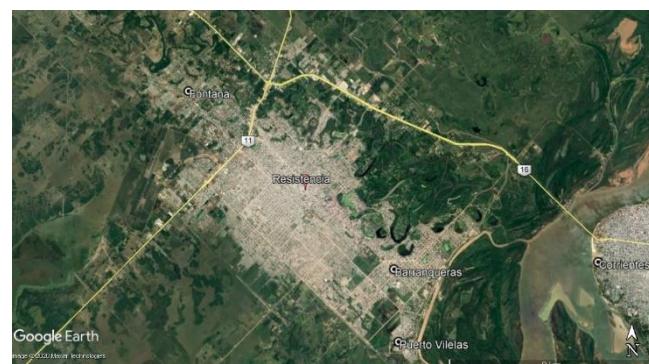


Figura 1: Ubicación de los diferentes municipios del Área Metropolitana del Gran Resistencia. (Fuente: Google Earth, 10/Oct/2020).

Investigaciones recientes sobre eventos hidrometeorológicos extremos consolidan la propuesta metodológica de considerar el valor límite estimado o Precipitación Máxima Probable a partir de la estimación estadística, apoyando la variabilidad temporal del fenómeno en estaciones pluviométricas automáticas y asumiendo que los máximos medidos no ocurren simultáneamente en todos los puntos del área analizada [5].

Estudios realizados por investigadores de institutos de la Provincia de Córdoba han demostrado que, para

estaciones pluviométricas de zonas húmedas con un promedio elevado de los máximos anuales de precipitación diaria, se produce un aumento del factor de frecuencia FPMP y de la Precipitación Máxima Probable en la metodología propuesta por Hershfield [6].

METODOLOGÍA

La ocurrencia de lluvias extremas en la región

Las precipitaciones en la región nordeste de la Argentina tienen su máximo en el período que va de octubre a abril y son los denominados Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), que juegan un papel fundamental como generadores de precipitaciones locales intensas. Los fenómenos atmosféricos a escala sinóptica –del orden de un día– pueden provocar procesos convectivos muy localizados en el espacio. La interacción entre un sistema de baja presión y un frente frío suele ser la causa de lluvias intensas en la región, lo que llega a potenciarse por una fuerte actividad convectiva [7]. Las nubes de gran desarrollo vertical, con una extensión superior a los 10 km, evolucionan toda vez que las condiciones de inestabilidad atmosférica son favorables, dando lugar a precipitaciones intensas de corta duración. Cuando las inestabilidades internas de la masa de aire generan condiciones propicias para el desarrollo convectivo –movimiento de ascenso del aire– en los niveles intermedios de la atmósfera, dan lugar a los Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), con una fase inicial que tiene lugar durante las primeras horas de la noche, debido al enfriamiento de los topes de nubes. De ese modo se desarrollan celdas convectivas individuales, que comienzan a interactuar entre sí, conformando un sistema dinámico de mayores dimensiones que las celdas individuales, que se denomina complejo convectivo y que desarrolla su propio ciclo de vida (de 12 a 18 horas), que supera el de las celdas convectivas individuales (hasta 1 o 2 horas). Las imágenes de satélites meteorológicos revelan una estructura espacial de forma aproximada a una elipse con un eje mayor y un eje menor que alcanzan algunas decenas de km, conformando una región dentro de la cual existe una subzona donde la actividad convectiva es más intensa y por lo tanto la precipitación generada es máxima. Esta detallada descripción de los CCM permite diferenciarlos de las tormentas convectivas aisladas de verano porque producen mayor cantidad de precipitación debido a su mayor extensión en área y a su ciclo de vida más largo [8]. Los procesos descritos parecen ser los patrones

dominantes de la ocurrencia de las altas precipitaciones registradas en los eventos mencionados.

Tormentas extremas en el AMGR

Los eventos extremos de precipitación que han ocurrido en los últimos años y en particular las intensidades registradas en intervalos de corta duración, parecerían difíciles de ser asociados a una recurrencia o período medio de retorno, dando la impresión de conformar una serie no estacionaria, es decir, con crecimiento de la severidad de las tormentas con el tiempo, (Figura 2) para los últimos 60 años en Resistencia, en registros compilados por el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. En el caso de los eventos mencionados en la introducción de este trabajo, han sido analizados a partir de la reconstrucción de su curva masa con los datos obtenidos del pluviómetro automático a cangilones que opera en la Estación Meteorológica de Capacitación, la cual almacena en su base de datos los valores precipitados cada 5 minutos.

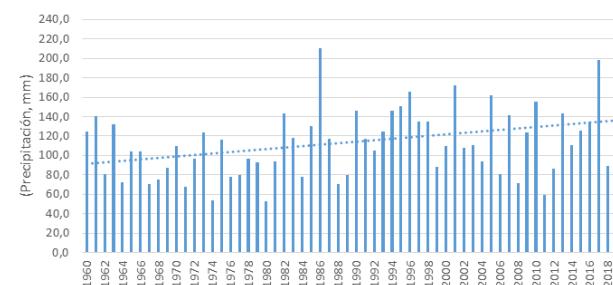


Figura 2: Línea de tendencia de la Precipitación Máxima Diaria para Resistencia

En estudios anteriores realizados para analizar la variación espacial de las precipitaciones críticas en el AMGR [9] se habían detectado que 7 de los 10 eventos anuales de mayor rigor tuvieron ocurrencia en los últimos 15 años, la mayoría de ellos en la década de los años '90, en coincidencia con las crecidas de los grandes ríos de la región. Si se observa la variable frecuencia de días con tormenta relevada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el Aeropuerto Resistencia, puede concluirse que a partir de la década del '90 hay un marcado aumento de los días con precipitación registrable (> 0.1 mm) en relación a lo que ocurría en las décadas anteriores [10]. Los valores de la última década procesada (2001-2010) muestran una frecuencia anual de 90 eventos, concentrando 62 de ellos (el 69 %) en el período octubre-abril, mientras que para los 35 años del período 1988/2012 la Estación Meteorológica Campus Resistencia UNNE que opera el Departamento de

Hidráulica muestra un promedio de 75 eventos anuales [11].

Al analizar la frecuencia de ocurrencia de los eventos máximos diarios para el registro de 60 años en Resistencia, surge claramente un predominio del cuatrimestre enero-abril, en el que se concentra el 68 % de los registros, con una dominancia de los meses de enero y marzo, seguidos de abril y finalmente febrero, donde su porcentaje se iguala al de noviembre, que domina las ocurrencias sobre el final del año. En la Figura 3 puede verse la distribución de frecuencias absolutas de los 60 valores máximos anuales.

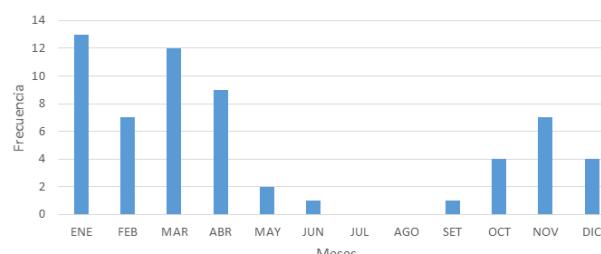


Figura 3: Distribución de frecuencias absolutas de máximos diarios anuales en Resistencia, según el registro de la Estación Meteorológica Campus Resistencia-UNNE.

En el procesamiento de la información para intervalos de lluvias intensas de corta duración son utilizadas las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia procesadas por el equipo de investigadores del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, aplicando el Programa AFMULTI [12] para la adopción de las funciones teóricas de probabilidad con mejor ajuste y determinando las funciones matemáticas para la representación de las IDF con apoyo del Programa Solver de Excel [13]. Dichas curvas han sido adoptadas oficialmente por la Administración Provincial del Agua del Chaco (APA).

Eventos máximos diarios en estaciones de la región.

Con el objeto de obtener información que permita extender el análisis y disponer de elementos comparativos de los eventos extremos diarios a otros puntos de la región, dando cobertura en particular, además del este del Chaco (con foco en Resistencia), al oeste de la provincia de Corrientes y la franja oriental de Formosa, se procedió a realizar el análisis estadístico de los máximos diarios anuales de precipitación en las siguientes estaciones: Corrientes AERO, Santa Lucía, San Luis del Palmar y Clorinda, a partir de la información provista por la Base de Datos Hidrológica Integrada que opera la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación para las tres primeras y de la red pluviométrica de la provincia de Formosa

para Clorinda. En el caso de esta última, se completó el registro requerido en los últimos 5 años (2015-2019) con los datos de la Estación Puerto Pilcomayo (Formosa), distante 14 km de Clorinda y que forma parte de la Base de Datos ya mencionada.

Aproximación estadística de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para el AMGR.

Dadas las características de los eventos extremos diarios ocurridos en el AMGR en los últimos años, y en particular la frecuencia con que han aparecido en el período húmedo 2015-2019, se ha considerado necesario incorporar el análisis de la precipitación máxima probable (PMP), en cuanto ésta se trata de un evento extremo máximo con una probabilidad límite, finita y tendiente a cero, pero no nula de suceder, por lo que carecería de sentido práctico querer asociarla a una recurrencia determinada [14]. En base a los datos disponibles en nuestra región, aparece más conveniente recurrir a los métodos estadísticos de estimación de la PMP. En este trabajo se siguió el criterio enunciado por Hershfield [15], que se basa en minimizar la probabilidad de ocurrencia de una tormenta, maximizando el factor de frecuencia de la ecuación general propuesta por [16] y [17]:

$$y = \mu_y + \Phi_y \cdot \sigma_y \quad (1)$$

donde “y” es la variable aleatoria, “ μ ” y “ σ ” la media y el desvío estándar de esa variable aleatoria y “ Φ ” el factor de frecuencia.

Según el criterio de Hershfield, se puede suponer que cuando la precipitación tienda a su límite superior (la PMP), ese valor superará a la media en una cierta cantidad de veces el desvío estándar. Entonces:

$$PMP = \mu_y + \Phi_{PMP} \cdot \sigma_y \quad (2)$$

Entonces, el valor “ Φ_{PMP} ” podría estimarse a partir de los registros disponibles, tomando el máximo valor de los “n” registros, excluyéndolo de la serie y determinando el “ Φ_{n-1} ” de los “n-1” restantes:

$$P_{MÁX} = P_{med; n-1} + K_{n-1} \cdot S_{n-1} \quad (3)$$

donde “ $P_{MÁX}$ ” es el valor máximo de la serie de “n” precipitaciones diarias máximas anuales, “ $P_{med; n-1}$ ” y “ S_{n-1} ” la media y el desvío de la serie de “n-1” valores, excluyendo el valor “ $P_{MÁX}$ ”, y “ K_{n-1} ” el valor que satisface matemáticamente la ecuación (2) y que, según lo explicado, sería una estimación del valor de “ Φ_{PMP} ”.

Continuando con el mismo razonamiento, en este trabajo también se calcularon los valores de “ K_{n-2} ”, “ K_{n-3} ”, etc., tomando siempre como referencia la $P_{\text{máx}}$ de la serie, buscando detectar si existía alguna tendencia en el comportamiento del valor de Φ a medida que “ $n-i$ ” disminuye (o sea, “ i ” aumenta).

Para el presente trabajo, el proceso de cálculo se realizó para truncamientos de la serie original hasta excluir todos los valores máximos que cumplían la condición siguiente:

$$P_{\text{max}} \geq P_{\text{media}} + S_n \quad (4)$$

Respecto al valor del factor de frecuencia “ Φ ” encontrado en trabajos específicos, se observa una gran dispersión: por citar solo algunos, mientras Herchfield estimó ese valor en 15, otros investigadores de Sudamérica [16] han propuesto valores más bajos, del orden de 5 a 10 veces el desvío estándar de la media histórica, mientras que la Organización Meteorológica Mundial (1983) propone una expresión para las lluvias más intensas registradas en el mundo en función de la duración del evento en horas que resulta en valores extremadamente elevados. Es evidente que en este último caso se están considerando en un mismo análisis climas muy diversos del planeta, en particular los eventos de climas monzónicos, que corresponden a los mayores valores registrados, para lo cual la expresión de la OMM representaría una suerte de “techo” para cualquier estimación de la PMP.

RESULTADOS

Tormenta del 11 de marzo de 2017.

El evento extremo ocurrido el sábado 11/03/2017 se inició a las 1:55am y finalizó a las 11:05am, con un total precipitado de 198 mm, pero concentrando el mayor volumen entre las 4:35am y las 6:50 am, por lo que en 2 horas y 15 minutos (135 minutos) cayeron 160 mm, que representa una intensidad promedio de 71 mm/h y un período de intensidad máxima de 103.4 mm/h que se sostuvo durante 80 minutos.

El 70 % del AMGR quedó bajo agua con anegamientos de diferente magnitud, que en las zonas más bajas alcanzó alturas de hasta 50 cm sobre las veredas, mientras que un gran sector del casco céntrico alcanzó alturas del orden de 10 a 15 cm, dificultando el tránsito vehicular y peatonal, con anegamiento de calles en el sector céntrico de Resistencia como consecuencia de la tormenta ocurrida, que determinó el establecimiento de emergencia en el tránsito por parte del Municipio local.

El escurrimiento hacia las vías principales de desagüe se vio impedido por el gran volumen precipitado, que generó efectos de remanso por la insuficiencia de conducción del sistema existente.

Ocurrencia de tormentas en 2019.

La ocurrencia de eventos de precipitación durante los primeros meses del año 2019 muestra una frecuencia normal para el período otoñal, pero no así en los montos precipitados, y esa anomalía se remonta al mes de abril de 2018, que según los registros meteorológicos de la ciudad de Resistencia fue el más caluroso en 60 años, lo que generó condiciones para el inicio de un período anual extraordinario de gran disponibilidad de humedad en la atmósfera en toda la región central de Sudamérica [18]. Asimismo, se presenta un debilitamiento de los sistemas frontales provenientes de la región antártica, dejando lugar a un predominio de masas frías provenientes del Océano Pacífico Sur con buen contenido de humedad y muy lento desplazamiento. Ello dio como resultado la aparición de numerosas celdas de tormenta de escaso desplazamiento y gran volumen de humedad, donde la mayor parte de la energía incorporada se invierte en lluvia, ya que han sido escasas las situaciones de vientos fuertes. Por otra parte, el Océano Atlántico continuó con temperaturas cálidas en superficie, lo que sumado al debilitamiento de los frentes subpolares, han generado en la zona centro-sur de Sudamérica un corredor libre de humedad sometida a ascensos forzados por las suaves pendientes que separan las masas frías de las cálidas, contribuyendo al desarrollo vertical de nubes convectivas de buen volumen, conformando el siguiente patrón: mes con más de una quincena de lluvias abundantes seguido de mes y medio a dos meses de lluvias normales a escasas y luego otro mes con lluvias abundantes. Este comportamiento no solo afectó al Chaco sino también al centro y norte de Argentina, todo el Paraguay, centro y este de Bolivia y todo el este-sudeste brasileño, conformando lo que se denominan “Sistemas Convectivos de Mesoscala” (SCM), formados por un conjunto de tormentas puntuales y con características muy diferentes al entorno, como un proceso de “tropicalización” cada vez más común en nuestra zona (Lic. Julio C. Ríos, comunicación personal).

En el contexto descripto se produjeron sobre el AMGR los eventos del 8/9 de enero y del 20/abril, ambos de 2019, totalizando en los registros del Campus Resistencia-UNNE 237.0 mm y 174.0 mm respectivamente, constituyendo el primero de ellos el máximo registro diario en 60 años, mientras que el segundo se ubicaría en el cuarto lugar de no haber

ocurrido en el mismo año. El evento de enero tuvo una duración total de 14 horas y 35 minutos, tiempo que en realidad involucra dos tormentas intensas, la primera de ellas durante la noche del 8 de enero con una duración de 2 horas y 45 minutos, y la segunda en la madrugada del día 9 con una duración de 3 horas y 15 minutos (3,58 horas), como puede observarse en el hietograma de la Figura 4.

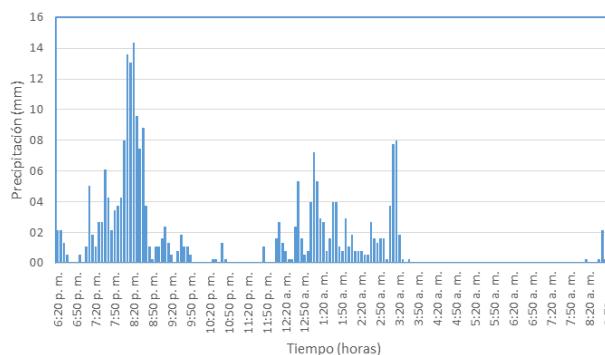


Figura 4. Hietograma de la tormenta registrada entre la noche del día 8 y la mañana del día 9 de enero de 2019 en el Campus Resistencia de la UNNE.

Dichas tormentas se desarrollaron en un total de 9 horas, que incluye una interrupción de 2 horas casi sin lluvia, y con un período de mayor intensidad entre las 19:10 y las 20:35, en el que precipitaron 107.2 mm, con una intensidad de 75.7 mm/h y uno de máxima intensidad entre las 20:00 y las 20:35 con agua caída de 74.9 mm y una intensidad de 128.4 mm/h.

El evento ocurrido el sábado 20 de abril de 2019, si bien con una precipitación total bastante menor al evento analizado anteriormente, con 174.0 mm, ocurrió principalmente entre las 7:15 y las 9:30, o sea 2 horas 15 minutos (2.25 horas) en las que llovieron 152.3 mm (88 % del total), lo que representa una intensidad de 67.8 mm/h, que excede el TR de 50 años de las curvas IDF actualmente disponibles para Resistencia.

En la Figura 5 puede observarse la concentración temporal del evento mencionado, lo cual marca una diferencia de montos con la registrada el 8/9 de enero en períodos similares, aun considerando el momento del evento mayor en esta última.

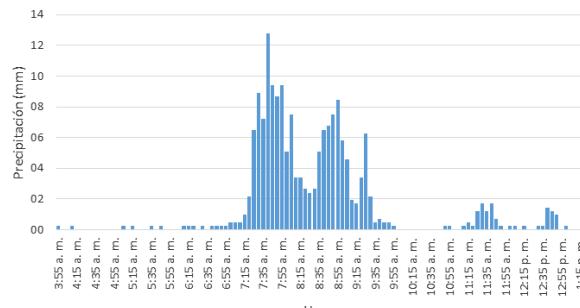


Figura 5. Hietograma de la precipitación ocurrida el sábado 20 de abril en Resistencia, en base al registro de la EMA del Campus Resistencia-UNNE.

Los valores de precipitación de las tormentas analizadas de enero y abril de 2019 fueron similares, siendo ligeramente mayor en abril, pero mientras las intensidades de precipitación de enero fueron similares a las utilizadas en el diseño (inferiores o del orden de los 10 años), las ocurridas en abril fueron muy superiores a las de diseño, según puede observarse en las láminas acumuladas para diferentes TR [19], según las curvas I-D-F adoptadas por la Administración Provincial del Agua del Chaco – APA (la máxima autoridad hidráulica provincial, responsable, entre otras cosas, de mantener actualizadas dichas curvas), para el AMGR, al compararlas con el registro correspondiente a una estación no oficial, operada por un particular, ubicada en Av. Ávalos, en la zona del hipermercado Carrefour (Figura 6).

Resulta evidente que, a partir de los tres eventos extremos analizados, ocurridos en los últimos tres años, se impone una necesaria actualización de la información para el trazado de las curvas IDF, de modo de reajustar los valores de probabilidad de ocurrencia a las situaciones reales mencionadas. Esto es así dado que las curvas que son actualmente utilizadas han sido ajustadas con la información disponible hasta el año 2005 [13], por lo que hay 14 años de datos que deben ser incorporados en el análisis.

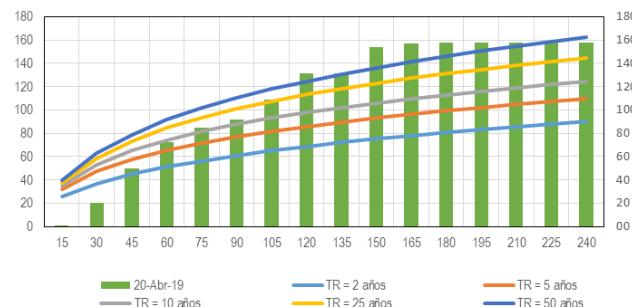


Figura 6. Láminas de precipitación (en mm) para diferentes TR comparadas con el hietograma del evento del sábado 20 de abril, según los registros de la Estación Zabala, en Avenida Ávalos, zona Carrefour.

Máximos diarios en estaciones de la región.

Si bien la extensión de las series disponibles de las estaciones seleccionadas para Chaco, Corrientes y Formosa es diferente, todas abarcan al menos tres décadas de información y están actualizadas al año 2019, por lo que se puede considerar que es un análisis dentro de la serie que podría denominarse “moderna”, conteniendo por lo tanto el registro de los eventos extremos que se pretende analizar.

Las estadísticas de los registros de esas estaciones son mostradas en la Tabla 1. Las mismas se obtuvieron utilizando programa AFMULTI [12].

Tabla 1. Síntesis de los estadísticos principales para la serie de máximos diarios anuales, en cinco estaciones pluviométricas de la Región Nordeste

Estación	Registro (años)	Media (mm)	Desvío (mm)	Asimetría	Valor extremo (mm)
Resistencia	60	113.7	37.71	0.89	237.0
Corrientes	38	153.1	46.54	0.94	307.0
Santa Lucía	51	111.7	43.53	0.53	217.0
San Luis del Palmar	34	129.6	42.19	0.23	215.0
Clorinda	53	101.1	34.54	1.32	228.0

La primera observación de interés es que los valores extremos diarios de cada serie superan los 200 mm en todos los casos, pero en Corrientes alcanzaron a 307 mm, superando en 70 mm a la estación de orden siguiente, Resistencia, siendo que la distancia entre los aparatos de registro en ambas es de 22 km, lo que da una pauta de la concentración de los eventos convectivos asociados con situaciones extremas.

Ese valor máximo determina que resulte Corrientes la de valores mayores en los estadísticos “media” y “desvío estándar”, posicionándose en segundo lugar por su asimetría positiva, pero como consecuencia que San Luis del Palmar presenta un único extremo superior a 200mm, caso que no se repite en las demás estaciones. Aquí también cabe destacar que la distancia entre Corrientes y San Luis del Palmar es de sólo 21,5 km, estando esta última ubicada al este de la Capital provincial.

Evento máximo probable para Resistencia.

Al aplicar el procedimiento descrito en el apartado 2.4, tomando los valores extremos de cada serie, utilizando la media y desvío estándar presentadas en la Tabla 1, se puede observar que el valor máximo del factor de frecuencia (K) correspondió a la serie de Clorinda, que fue 3.7, mientras que para las series de Resistencia y Corrientes fue 3.3.

Como se explicó en el mencionado apartado 2.4, también se calcularon los valores de “ Φ_{n-2} ”, “ Φ_{n-3} ”, etc., tomando siempre como referencia la Pmáx de la serie.

El truncamiento explicado en la ecuación (4), para la serie de 60 años para Resistencia correspondió a 151,6 mm, siendo 7 los valores extremos que cumplen esa condición.

Al tratarse de una serie con asimetría positiva, o sesgo hacia los valores máximos de la muestra, el considerar los mencionados 7 valores extremos, da una pauta bastante sólida para la adopción del factor de

frecuencia para la PMP, siempre en el sentido de maximizar el resultado final. En la Figura 7 se puede observar que ese procedimiento muestra como tendencia que el valor del factor de frecuencia no supera la magnitud de $\Phi = 5$, por lo que al aplicarlo se obtiene una PMP para eventos de 1 día de duración, para Resistencia, de 302.2 mm.

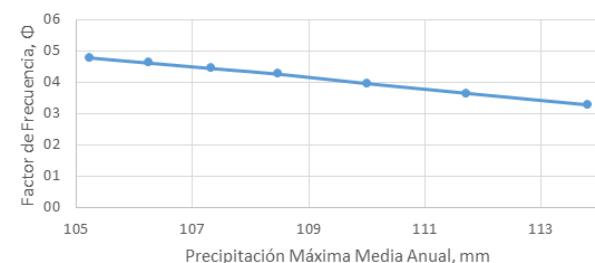


Figura 7. Tendencia del Factor de Frecuencia de Hershfield en función de la Precipitación Máxima Media Diaria para Resistencia, Estación Campus Resistencia-UNNE.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Si bien el valor de PMP obtenido parece tener una aceptable razonabilidad en función de los datos observados en los 60 años de registro, no puede dejar de mencionarse que en la región se han registrado precipitaciones extremas diarias del orden (o superiores a) de 300 mm, en la Estación Corrientes Aero (307 mm, abril de 1983), en Goya (313 mm, abril 1998), todos ellos registros disponibles en la página del Servicio Meteorológico Nacional (www.smn.gob.ar) y en el año 2019, la Policía del Chaco informó un valor extremo en Enrique Urien, de 340 mm, el domingo 5 de mayo (registros disponibles en policia.chaco.gov.ar), por lo cual el valor calculado para el AMGR, de 302.2 mm, debe tomarse como una estimación de la PMP, con la precaución que indican los valores superiores recién mencionados.

El máximo valor de factor de frecuencia para la estimación de la PMP obtenido en los análisis realizados en el contexto del presente trabajo fue 5, que aparece como un valor razonable para la región NEA. Los valores superiores de ese factor de frecuencia sugeridos en algunas publicaciones [16] corresponden a otras regiones y latitudes, inclusive a promedios globales que abarcan fenómenos de génesis diferentes.

Con la información disponible, se podría concluir que para la región NEA el valor 5 para el factor de frecuencia sería adecuado. Esta afirmación es razonable, teniendo en cuenta, por ejemplo, que las tablas para estimar el equivalente a ese factor de frecuencia para distribuciones de probabilidades de valores extremos, como por ejemplo la distribución Log-Pearson III (basada en la distribución general de

Chow, con la aproximación de [20], no muestran valores superiores al sugerido.

CONCLUSIONES

Los eventos extremos de precipitación que ocurren en el AMGR y que caracterizan actualmente a la hidrometeorología de la región Nordeste de Argentina están insertos dentro de los denominados Complejos Convectivos de Mesoscala (CCM), que juegan un papel determinante en su génesis.

La ocurrencia de los eventos extremos de un día de duración que se produjeron entre los meses de enero y abril del año 2019, y que por su magnitud ocupan las posiciones 1 y 4 entre los máximos de los últimos 60 años, son producto de un calentamiento extraordinario de la atmósfera en la región central de Sudamérica desde abril de 2018, un debilitamiento de los sistemas frontales de la región antártica y un sostenimiento del calentamiento superficial del Océano Atlántico, lo que creó un corredor libre de concentración de humedad en la región.

El análisis en particular del evento ocurrido el sábado 20 de abril de 2019, que concentró el 88 % del total precipitado en 135 minutos, de un modo tal que las láminas de lluvia acumulada para las duraciones comprendidas entre 2 y 3 horas muestran tiempos de recurrencia superiores a los 50 años, según las curvas IDF vigentes para el AMGR, son un indicio de la necesidad de una actualización de esas curvas y, además, los últimos 14 años de datos pluviográficos aún no han sido incorporados a esa herramienta de diseño hidrológico e hidráulico.

Por otra parte, haciendo un análisis geográficamente más amplio, que abarque otras estaciones de registro de la región, aparecen valores puntuales singulares, que modifican sensiblemente las estadísticas de las últimas décadas, destacándose la Estación Corrientes Aero, que vio afectada su media por la tormenta de 307 mm. Esto estaría demostrando la forma altamente concentrada en la que se producen los eventos convectivos extremos, ya que la distancia de esta última con otras dos de las estaciones analizadas (Resistencia y San Luis del Palmar) no supera los 22 km.

Resulta absolutamente necesario que se promueva la continuidad de lecturas sistemáticas en las estaciones pluviométricas y pluviográficas del AMGR, se garantice un eficiente procedimiento técnico para la lectura de cada evento intenso, con un adecuado mantenimiento del instrumental utilizado y, en la medida de lo posible, se aumente la densidad de puntos de observación para conocer mejor la extensión superficial de las celdas convectivas.

Dadas las condiciones críticas que para la población y la infraestructura se generan en el AMGR ante la ocurrencia de eventos como los analizados, se consideró necesario realizar una estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para una duración diaria aplicando el criterio estadístico de Hershfield, lo que arrojó un valor para el Factor de Frecuencia $\Phi = 5$, resultando como consecuencia una PMP diaria de 302.2 mm, monto que debería ser tenido en cuenta para llevar adelante el diseño de los planes de contingencia en situaciones hídricas de inundación.

REFERENCIAS

- [1] INDEC (2010); “Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010”. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-3-6-22-140-20100>
- [2] Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1994); “Hidrología aplicada”, Mc Graw-Hill Interamericana, Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- [3] Pilar, J. V., Depetris, C. A., Broner, S. J., (2000); “Estimación de PMP en la Cuenca del río Negro (Chaco)”, XVIII Congreso Nacional del Agua, Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina.
- [4] Romanazzi, P. G., (2014); “Aproximación a la estimación estadística de la Precipitación Máxima Probable para La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina”, II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fé, Argentina.
- [5] Bazzano, Flavia (2019); “Predicción de lluvias máximas para diseño hidrológico. Desarrollo experimental en la Provincia de Tucumán”. Tesis para acceder al grado de Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- [6] Catalini, C., García Rodríguez, C., Caamaño Nelly, G., Ordóñez, S. (2014); “Regionalización paramétrica y valores límites estimados en la Región Central Argentina”. IV Taller de Regionalización de precipitaciones máximas. UNT, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- [7] Pilar, J. V., Depetris, C. A. (2000); “Análisis de una lluvia intensa real”, Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.
- [8] Berry, G.J. (2001); “Hidrometeorología de las inundaciones en la Argentina y en el AMBA”, Editores: Kreimer, Kullock, Valdés, The World Bank, Washington, D.C.

- [9] Depetris, C. A., Rohrmann, H. R., Kutnich, E. J., Parini, P. I., (2011); “Análisis de la variación espacial de precipitaciones críticas en el AMGR”, XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco, Argentina.
- [10] Pérez, M. E., (2009); “El comportamiento témporo-espacial de los montos anuales de precipitación en el Nordeste Argentino”, Revista Geográfica Digital IGUNNE, Facultad de Humanidades-UNNE, Resistencia, Chaco, Argentina.
- [11] Ruberto, A., Depetris, C. (2013); “Estación meteorológica de capacitación. Publicación Didáctica Nº 3. 25 años:1988-2012”, Departamento de Hidráulica de la FI-UNNE. Imprenta de la Secretaría General de Extensión Universitaria de la UNNE. ISSN 1852-5806. Resistencia Chaco, Argentina).
- [12] Paoli, C. U., Bolzicco, J., Cacik, P. (1991); “Análisis de frecuencia para la determinación de la crecida de diseño”, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.
- [13] Ruberto A., Gabazza S., Kutnich J., Depetris C., Pilar J. (2007); “Actualización y análisis de las curvas IDF en el Área Metropolitana del Gran Resistencia”. Actas del XXI Congreso Nacional del Agua. San Miguel de Tucumán, Argentina,
- [14] Caamaño Nelly, G., Dasso, C., García, C., (2003); “Lluvias de diseño: conceptos, técnicas y experiencias”, Editorial Científica Universitaria, Córdoba, Argentina.
- [15] Hershfield, D. M. (1961); “Estimating the probable maximum precipitation”. Proceedings American Society of Civil Engineers, Journal Hydraulics Division, 87 (HY5).
- [16] Tucci, C.E.M. (1997); “Hidrología, Ciencia y Aplicación”, 2^a edición, Porto Alegre. Editora Da Universidade/UFRGS, ABRH.
- [17] Linsley, R., Kohler, M., Paulus, J. (1988); “Hidrología para ingenieros”, 2^a Edición. Cap. 11, Probabilidad en Hidrología: una base para diseño. McGraw Hill Interamericana, México.
- [18] Servicio Meteorológico Nacional (2018); “Boletín climatológico – Volumen XXX – Nº 4- Año 2018”. ISSN 2314 2332. Ministerio de Defensa, Presidencia de la Nación. Buenos Aires, Argentina.
- [19] Orsolini, H., Zimmermann, E., Basile, P., (2008); “Hidrología. Procesos y métodos”, Cap. IX. Estadística Hidrológica. UNR Editora de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
- [20] Kite G.W. (1977); “Frequency and Risk Analyses in Hydrology”, Colorado, USA, Water Resources Publications, Fort Collins.