

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

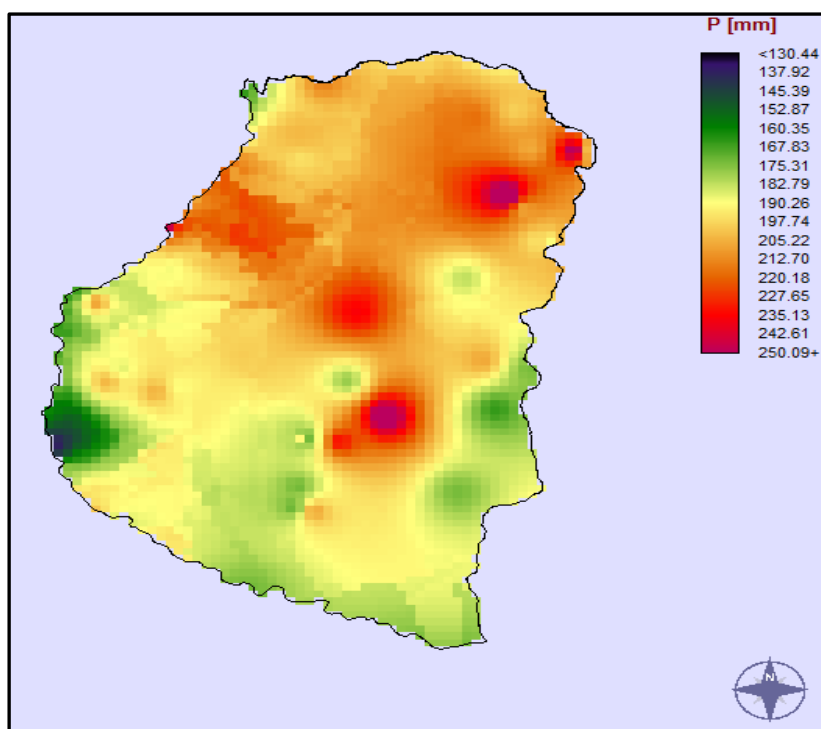
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES

CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

PRACTICA SUPERVISADA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

*“REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS
EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS”*



AUTOR: ALDONZA, JUAN CRUZ.

TUTOR INTERNO: DR. ING. GARCÍA, CARLOS MARCELO.

SUPERVISOR EXTERNO: ING. GUILLÉN, NICOLÁS FEDERICO.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios y a la virgen de Lourdes.

- A mi familia, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su apoyo y cariño incondicional, por sostenerme en mis caídas y festejar mis logros; a mis Padres por enseñarme los valores correctos, por aconsejarme en los momentos de vacilación, por brindarme la oportunidad de construir mi futuro.

- A mi abuela Elda y a mi amigo Jere, esas dos estrellitas que desde arriba estuvieron siempre para guiarme, ayudarme y darme la tranquilidad en todos los momentos de mi vida.

- A mis amigos, los de toda la vida y los que conocí en esta hermosa ciudad. Gracias a ellos los días se hicieron llevaderos y alegres.

- A mi amigo Héctor, el cual siempre estuvo en los buenos y en los malos momentos, siempre brindando su aliento para seguir adelante, sufriendo juntos, hasta poder lograr este hermoso objetivo.

- A Nicolás, supervisor externo, quien me guió a lo largo de toda la práctica supervisada; sin su ayuda, enseñanza y paciencia este trabajo no podría haber sido posible.

- Al Dr. Ing. Carlos García, por su aporte de experiencia en la materia, una gran admiración y respeto hacia él.

- A los docentes de esta casa de estudios, que ayudaron en mi formación como ingeniero, por su dedicación en la enseñanza.

TÍTULO: REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS.

Palabras Claves: *Precipitación Máxima Diaria Anual, Regionalización, Sistemas de Información Geográfica, Periodo de Retorno.*

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló dentro del grupo de investigación en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, con el fin de generar herramientas para estimar el valor de la lámina de lluvia para diseño hidrológico en la provincia de Entre Ríos. Teniendo en cuenta que para predecir esta lámina de lluvia para distintas duraciones, se necesitan registros continuos que se obtienen con *pluviografía*, y que los mismos son escasos espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información *pluviométrica* habitualmente disponible. Esta información de lámina de lluvia precipitada diaria es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización del valor de la lámina de lluvia diaria estimada para distintas probabilidades de excedencia, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

En primer lugar, se seleccionaron registros de un conjunto de estaciones pluviométricas. A partir de esta información se elaboraron las series históricas de máximos diarios anuales. Luego se verificó que las series elaboradas cumplan las hipótesis estadísticas básicas requeridas para hacer un análisis de estadística inferencial (presencia de datos atípicos, independencia, estacionariedad y homogeneidad). Luego se realizaron 6 ajustes de funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lámina de lluvia para los siguientes periodos de retorno, $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años, como así también los valores de los intervalos de confianza. Se seleccionó la función de distribución *LogNormal* como óptima para este estudio y se estimaron los valores de lámina de lluvia máxima diaria para distintas probabilidades de excedencia. Dichos valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron para la provincia de Entre Ríos mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de 25 [km²]. Finalmente, se compararán los mapas obtenidos con los resultados que obtuvo Zamanillo en la provincia de Entre Ríos en el año 2009 y se analizarán las diferencias existentes entre ellos.

INDICE

1. MARCO REFERENCIAL.....	13
1.1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.1. Antecedentes de estudios sobre lluvias máximas diarias para diseño hidrológico en Argentina.....	14
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS.....	18
1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	20
1.3.1. Objetivo General.....	20
1.3.2. Objetivos Particulares.....	20
1.4. METODOLOGÍA.....	20
2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.....	22
2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	22
2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS.....	23
2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie.....	24
2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).....	25
2.2.3. Prueba de Estacionariedad (Kendall).....	26
2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).....	27
2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	28
2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.....	29
2.3.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad.....	29
2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos.....	29
2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.....	30
2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.....	31
3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA.....	33
3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA.....	33
3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	33
3.3. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.....	35
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA.....	37
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR.....	37
4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	39
4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS HIDROLÓGICOS.....	42
4.3.1. Detección de datos atípicos.....	42
4.3.2. Prueba de Independencia.....	44
4.3.3. Prueba de Estacionariedad.....	45
4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.....	45
4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	46
4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad.....	46

4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.....	57
4.4.3. Contraste entre las distintas funciones de ajuste por Métodos de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud.....	58
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS.....	59
5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS.....	59
5.1.1. Detección de presencia de Datos Atípicos.	59
5.1.2. Prueba de Independencia.	59
5.1.3. Prueba de Estacionariedad.	60
5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.	60
5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log Normal.	62
5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.	65
5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	66
6. CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA.	68
6.1. INTRODUCCIÓN.....	68
6.2. CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.....	68
6.3. CREACIÓN DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES.	70
6.4. GENERACIÓN DE UNA MÁSCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACIÓN.....	73
6.5. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING.....	76
6.6. MAPAS DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	80
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	85
7.1. INTRODUCCIÓN.....	85
7.2. COMPARACIÓN CUALITATIVA ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS CON LA METODOLOGÍA PROPIA Y LA APLICADA EN EL TRABAJO “PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DE TORMENTAS DE DISEÑO PARA LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS”.....	85
7.3. COMPARACIÓN CUANTITATIVA ENTRE MAPAS GENERADOS EN ESTE TRABAJO Y EL ANTECEDENTE ELABORADO POR ZAMANILLO, 2009.....	87
7.3.1. Introducción.....	87
7.3.2. Metodología utilizada para la comparación.....	89
7.4. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS CON LA METODOLOGÍA PROPIA Y EL MAPA DE ISOHIETAS DE LLUVIA TOTAL MEDIA ANUAL EN LA REPÚBLICA ARGENTINA PROVISTO POR EL INTA.	98

8. CONCLUSIONES.....	100
8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	100
8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.....	102
8.3. TRABAJOS FUTUROS.....	102
9. REFERENCIAS.....	103

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Antecedentes de hechos hasta la actualidad, para un año de recurrencia de $T=100$..</i>	16
<i>Figura 2: Mapa de Isohietas de Precipitaciones máximas diarias para una duración de 1 día y un periodo de retorno de 50 años.</i>	17
<i>Figura 3: Mapa Político de la Provincia de Entre Ríos (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)</i>	18
<i>Figura 4: Mapa Físico de la Provincia de Entre Ríos (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)</i>	19
<i>Figura 5: Mapa Climático de isohietas anuales e isotermas anuales de la Provincia de Entre Ríos (Fuente: Instituto Geográfico Nacional).....</i>	19
<i>Figura 6: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Entre Ríos.....</i>	34
<i>Figura 7: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Entre Ríos</i>	35
<i>Figura 8: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación de Hernández en la Provincia de Entre Ríos</i>	39
<i>Figura 9: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación.....</i>	40
<i>Figura 10: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9).....</i>	40
<i>Figura 11: Salida de Estadística Base de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9).....</i>	41
<i>Figura 12: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9).....</i>	44
<i>Figura 13: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionariedad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9).....</i>	45
<i>Figura 14: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9).....</i>	46
<i>Figura 15: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad.....</i>	47
<i>Figura 16: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad.....</i>	48
<i>Figura 17: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno $T=25$ años</i>	48
<i>Figura 18: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	49

<i>Figura 19: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	49
<i>Figura 20: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	56
<i>Figura 21: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos</i>	58
<i>Figura 22: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de verosimilitud</i>	58
<i>Figura 23: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad.</i>	63
<i>Figura 24: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años</i>	64
<i>Figura 25: Estaciones finalmente seleccionadas de Entre Ríos</i>	67
<i>Figura 26: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop</i>	69
<i>Figura 27: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import</i>	69
<i>Figura 28: Cuadro de Diálogo Database Workshop – Export</i>	71
<i>Figura 29: Mapa con la localización de las estaciones en las provincias analizadas hasta la actualidad</i>	71
<i>Figura 30: Cuadro de Diálogo Export Vector File</i>	72
<i>Figura 31: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link</i>	72
<i>Figura 32: Cuadro de Diálogo Export Vector File</i>	72
<i>Figura 33: Mapa con la localización y valores de lluvias máximas diarias para T= 2 años, en las provincias analizadas hasta la actualidad</i>	73
<i>Figura 34: Cuadro de diálogo Import Dxf IDRISI</i>	74
<i>Figura 35: Cuadro de diálogo DXF / Idrisi conversión module</i>	74
<i>Figura 36: Cuadro de diálogo DXF / Idrisi conversión module</i>	75
<i>Figura 37: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR</i>	75
<i>Figura 38: Cuadro de diálogo Raster / Vector Conversión</i>	75
<i>Figura 39: Máscara utilizada para las Provincias analizadas hasta la actualidad</i>	76
<i>Figura 40: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation</i>	78

<i>Figura 41: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation</i>	78
<i>Figura 42: Raster interpolado por el método Kriging para T=2 años</i>	79
<i>Figura 43: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 2 años [mm]</i>	80
<i>Figura 44: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 5 años [mm]</i>	81
<i>Figura 45: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 10 años [mm]</i>	81
<i>Figura 46: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 20 años [mm]</i>	82
<i>Figura 47: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]</i>	82
<i>Figura 48: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 50 años [mm]</i>	83
<i>Figura 49: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 100 años [mm]</i>	83
<i>Figura 50: Mapa de Isohietas de Precipitaciones máximas diarias para una duración de 1 día y un periodo de retorno de 5 años.</i>	86
<i>Figura 51: Mapa de Isohietas de Precipitaciones Máximas Diarias para una duración de 1 día y un periodo de retorno de 5 años obtenida en este trabajo por el método Kriging.</i>	86
<i>Figura 52: Mapa de Precipitaciones Máximas Diarias elaborado por Zamanillo et al. (2009) para un T=50 años.</i>	88
<i>Figura 53: Mapa de Precipitaciones Máximas Diarias de la provincia de Entre Ríos elaboradas en este trabajo para un T=50 años.</i>	88
<i>Figura 54: Mapa de Diferencias Relativas para T=2 años.</i>	90
<i>Figura 55: Mapa de Diferencias Relativas para T=5 años.</i>	90
<i>Figura 56: Mapa de Diferencias Relativas para T=10 años.</i>	91
<i>Figura 57: Mapa de Diferencias Relativas para T=20 años.</i>	91
<i>Figura 58: Mapa de Diferencias Relativas para T=25 años.</i>	92
<i>Figura 59: Mapa de Diferencias Relativas para T=50 años.</i>	92
<i>Figura 60: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=2 años.</i>	93
<i>Figura 61: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=5 años.</i>	94

<i>Figura 62: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=10 años.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 63: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=20 años.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 64: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=25 años.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 65: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=50 años.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 66: Grafica que muestra la variación de las diferencias porcentuales menor que -15% y mayor que 15% a medida que varía el periodo de recurrencia.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 67: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para un Periodo de retorno T= 25 años [mm].....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 68: Lluvia media anual en la República Argentina (FUENTE: INTA).....</i>	<i>99</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Valores K_n para la prueba de datos atípicos.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2: Valores de K_{cri} para el test de Kendall</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994).....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Entre Ríos en función de su longitud de serie.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Entre Ríos (longitud de registro > 14 años)</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 6: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 7: Probabilidad empírica de la no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 8: Planilla resumen de datos pluviométricos.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 9: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 10: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 11: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Log-Pearson tipo III (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 12: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 13: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 14: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad LogNormal (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 15: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste</i>	<i>57</i>

<i>Tabla 16: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)..</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 17: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Entre Ríos</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 18: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Estacionariedad de sus valores máximos diarios de Entre Ríos.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 19: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Homogeneidad de sus valores máximos diarios de Entre Ríos.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 20: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 21: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 22: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 23: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 24: Depuración de las estaciones de Entre Ríos según las pruebas a verificar</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 25: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Entre Ríos</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 26: Valores de lluvias máximas diarias (PMD) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Entre Ríos.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 27: Diferencias Relativas Porcentuales para $\pm 15\%$ de diferencia entre el mapa generado por Zamanillo et al (2009) y el mapa del presente trabajo.</i>	<i>96</i>

1. MARCO REFERENCIAL.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Desde el punto de vista humano, el agua tiene un impacto positivo si se la considera como recurso hídrico y se tienen en cuenta los efectos benéficos, como son su uso doméstico, industrial, agrícola, minero, recreativo, entre otros. Mientras que, también se puede tener un impacto negativo si se habla de los fenómenos como amenazas hídricas; tal es el caso de los efectos nocivos producidos sobre seres vivos, suelos, infraestructura, seguridad, tránsito, etc.

Dentro de estos efectos nocivos se busca prevenir un desastre, el cual será todo evento o suceso, que generalmente ocurre de manera repentina e inesperada, provocando daños severos a una colectividad, región o país. Los desastres van a responder a amenazas, y evaluar las mismas implica pronosticar o predecir la ocurrencia y magnitud del fenómeno, con referencia en el mecanismo generador y el monitoreo y/o registro de eventos en el tiempo.

Cuando se pronostica se determina un monto y tiempo de ocurrencia breve (dadas las incertidumbres) para el suceso. Es decir que el pronóstico es un anticipo de lo que va a ocurrir, para poder avisar a la población amenazada sobre el fenómeno peligroso. En resumen, los modelos de pronóstico constituyen sistemas de alerta y se utilizan en situaciones de emergencia.

En cambio, en lo que respecta a la predicción, la misma no determina cuándo se producirá el evento hipotético, sino cuál será la magnitud del mismo, en función de su duración y recurrencia (con base en información probabilística); o bien, en el largo plazo, cuál será el evento máximo probable. Se asume que ocurrirá en algún momento de un período plurianual, relacionado con la planificación y dimensionamiento de obras en el área potencialmente afectable, con lo que resulta desacertado asignarle fecha u hora. En este ámbito de la predicción está incluido el tema de lluvias para diseño hidrológico.

“El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo”

La variable más relevante y requerida es el caudal, “Q”; que se predice con una estimación estadística, considerando la estacionariedad del fenómeno, y usando datos históricos, con una longitud de serie suficiente. Con esto se asegura que una muestra sea larga y representativa, con lo que se tendrá menos incertidumbre.

Lamentablemente los registros históricos de caudal no son habituales en Argentina, por ello se recurre a la información de lluvia, proceso físico generador del escurrimiento, y modelos de transformación lluvia-caudal.

Con la información de lluvias, para predecir la lámina para distintas duraciones, se necesitan registros continuos (pluviografía), y como la misma es escasa espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información pluviométrica habitualmente disponible. La misma es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización de la información pluviométrica, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

1.1.1. Antecedentes de estudios sobre lluvias máximas diarias para diseño hidrológico en Argentina.

En primer lugar y dado su carácter precursor en la temática se cita el trabajo elaborado por el Ing. Ruhle (1967), el cual ha sido desde su publicación ampliamente utilizado por los profesionales viales del país para determinar el caudal de diseño para infraestructura hídrica basándose en una serie de ábacos o gráficos. Entre los ábacos utilizados se encuentra la predicción de la lluvia de diseño utilizando cartografía elaborada para toda la República Argentina.

García (1994), presentó la “Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en la provincia de Córdoba”. Los objetivos del mismo fueron la regionalización de las lluvias máximas diarias para la provincia Córdoba, desarrollando tecnologías para la estimación de lluvias máximas con alcance regional, diseñando un procedimiento expeditivo de estimación para uso ingenieril que aporta herramientas de cálculo particulares para el territorio Provincial. En ese trabajo, cada serie de valores máximos de precipitación fue ordenado por año hidrológico sobre 141 puestos pluviométricos seleccionados en la Provincia, a los cuales se le ajustaron seis distribuciones teóricas de probabilidad: Gumbel, Lognormal, Gamma, Pearson, Normal y Weibull. Se adoptó la Distribución Lognormal como aquella capaz de caracteriza la pluviometría de todo el territorio Provincial. El análisis probabilístico realizado por el autor, determinó los índices estadísticos, la curva de frecuencia muestral y la frecuencia esperada. Mediante el trazado de isohietas por el método de mínima curvatura se obtuvieron coberturas continuas y dichos campos de precipitación fueron plasmados en sendos mapas para 20 períodos de retorno predefinidos (entre 2 a 200 años).

Maidah (2010) retomó el trabajo de García (1994) y bajo el título de “Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al Estudio de Lluvias Diarias”, desarrolló una herramienta técnica actualizada de similares características a la desarrollada en el trabajo de origen, con la ventaja de obtener en forma rápida y expeditiva, mediante las coordenadas geográficas de un punto de interés, las máximas precipitaciones diarias con recurrencia asociada. Los resultados de este trabajo incluyen los valores mínimos, medios y máximos (definidos por los intervalos de confianza) de los valores predichos de la lámina de lluvia máxima diaria para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 100 y 200 años en cualquier punto de la Provincia de Córdoba a un nivel de significancia del 95%. Empleando un Sistema de Información Geográfica (SIG), a través del programa IDRISI Andes, Maidah (2010) presentó raster de isohietas con recurrencias asociadas a partir de información de base que comprendió el periodo 1941-1996, así como un resumen de las principales características del SIG empleado.

Lérida y Sánchez (2011), elaboraron un estudio Metodológico para la determinación de una Grilla i-d-T consistente en la provincia de Córdoba. Este trabajo continuó los lineamientos de Maidah (2009) implementando el Modelo predictor DIT (Caamaño et al., 2003) en toda la provincia de Córdoba, regionalizando las variables hidrometeorológicas que permiten la regionalización de las funciones i-d-T.

Por su parte Bianchiotti (2012) realizó un análisis de la Precipitación Máxima Probable en la provincia de Córdoba a través de un Sistema de Información Geográfica, en el cual se actualizaron datos de estaciones pluviométricas de la base de datos original utilizadas en García (1994) y Maidah (2009) y agregaron nuevas estaciones.

Las publicaciones realizadas por Caamaño, Dasso (2003), y Catalini, Caamaño y Dasso (2011), sintetizan todos los antecedentes mencionados de estudios realizados para la provincia de Córdoba por el grupo de hidrología del Instituto Nacional del Agua y su Centro de Investigación de la Región Semiárida (INA-CIRSA) y el Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobrementemente Aforadas de la Universidad Católica de Córdoba (UCC-EHCPA) en lo referente a la predicción de lluvias causales de crecientes de proyecto, comprendiendo su magnitud, su validez a futuro, su transposición y su variación en el tiempo y el espacio e incluye ejemplos de aplicación.

En la provincia de Entre Ríos, Zamanillo et al. (2009) a partir de información pluviométrica existente combinada a nivel regional con registros pluviográficos disponibles generó una herramienta para la determinación de tormentas de proyecto. Estos resultados permiten calcular tormentas de diseño para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años en cualquier punto de la provincia incluyendo la estimación de una relación intensidad-duración-recurrencia (i-d-T) y la distribución temporal de la tormenta.

Recientemente, entre los años 2012 y 2013 se realizó un análisis análogo al realizado previamente en la provincia de Córdoba en las provincias de Santa Fe y San Luis (Catalini et al., 2011), lográndose la regionalización de las precipitaciones máximas diarias en estas dos provincias del centro de la Argentina.

Finalmente, entre los años 2014 y 2015, Guillén continuó aplicando la misma metodología (la de la provincia de Córdoba) en las provincias de Salta, Jujuy, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco y Formosa. En dicho trabajo finalmente se agruparon 885 estaciones en base a las cuales se realizaron los mapas de lluvia. A continuación, a modo de ejemplo se muestra el mapa de lluvia (Figura 1) obtenido para una recurrencia $T = 100$.

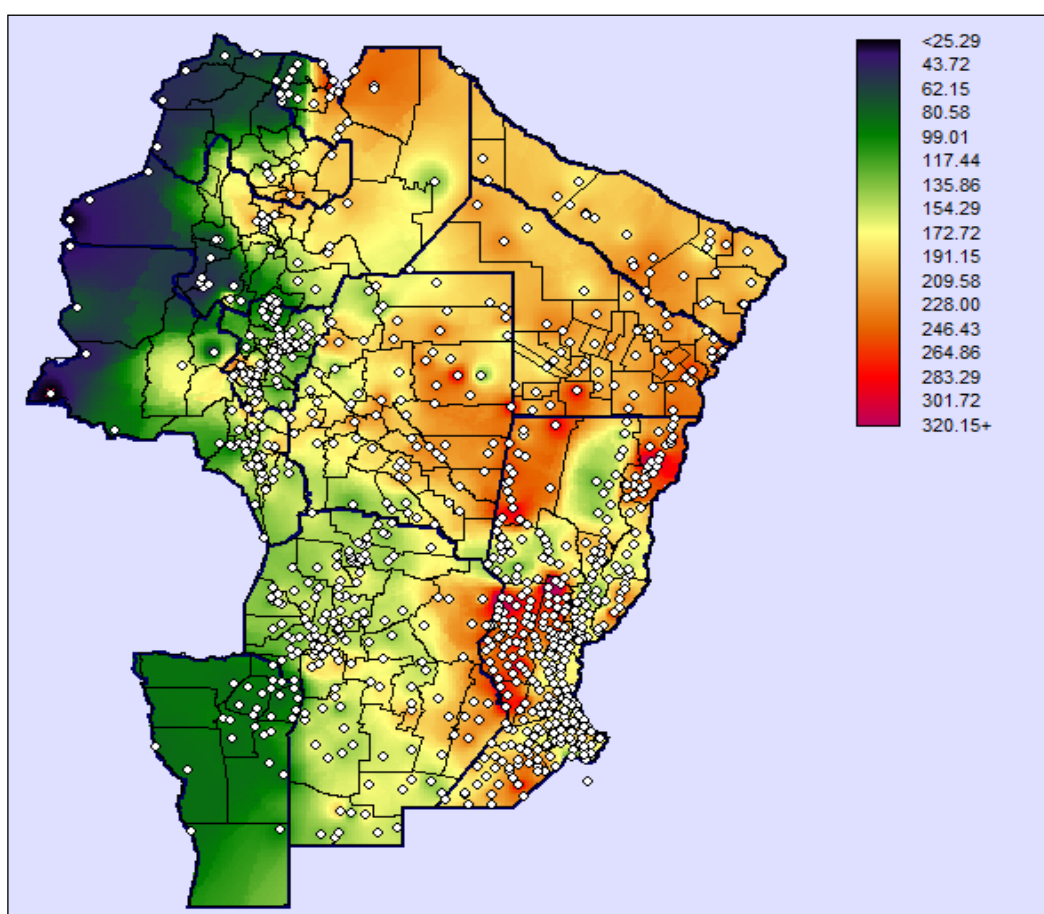


Figura 1: Antecedentes de hechos hasta la actualidad, para un año de recurrencia de $T=100$.

En el Litoral de Argentina existe sólo el antecedente de Zamanillo et al. (2009) pero la herramienta generada allí se realizó siguiendo una metodología distinta. Lo que con este trabajo se busca es uniformizar la provincia de Entre Ríos dentro del marco del proyecto nacional de generación de una herramienta para poder predecir la lluvia máxima diaria asociada a un tiempo de retorno dado.

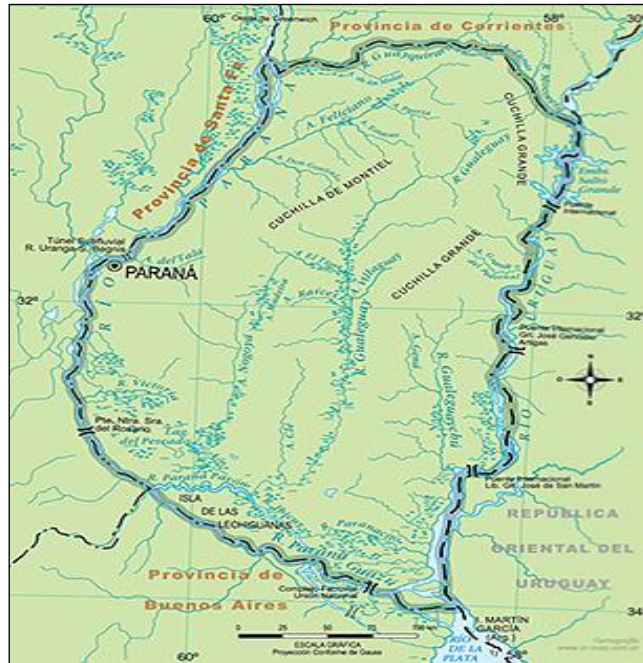


Figura 4: Mapa Físico de la Provincia de Entre Ríos (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

Con respecto al **clima**, son característicos el tropical sin estación seca al norte y el templado pampeano al sur. La provincia es recorrida por vientos provenientes del Océano Atlántico, además de los vientos locales como el Pampero, Sudestada y el Viento Norte. Las precipitaciones son abundantes en todo el año. En cuanto a la temperatura promedio, en verano es de 30°C de noviembre a marzo y en invierno un promedio de 10°C de junio a septiembre. En resumen, estas características se pueden apreciar en la Figura 5.



Figura 5: Mapa Climático de isohietas anuales e isotermas anuales de la Provincia de Entre Ríos (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.

1.3.1. Objetivo General.

Regionalizar la lluvia máxima diaria en la provincia de Entre Ríos.

1.3.2. Objetivos Particulares.

Para cumplir con el objetivo general mencionado anteriormente se definen algunos objetivos específicos:

- Realizar la búsqueda, depuración, esquematización y análisis de los datos pluviométricos existentes en la provincia de Entre Ríos.
- Participar en la recopilación, depuración y análisis preliminar de información pluviométrica.
- Entrenamiento en el uso y aplicación de un programa específico para el análisis estadístico (descriptivo e inferencial) de datos.
- Estimar los valores de lluvias máximas diarias para distintos T (períodos de retorno) para los registros seleccionados.
- Generación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa Idrisi Selva 17.00.
- Generación de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociadas a distintos T, de resolución espacial 25 [km²] utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG).
- Comparar los resultados obtenidos con los que consiguió Zamanillo utilizando una metodología diferente y formular una conclusión sobre los cambios.

1.4. METODOLOGÍA.

A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar los objetivos generales y particulares. El proceso se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Entrenamiento en el análisis estadístico de series hidrológicas.
2. Recopilación y procesamiento de series pluviométricas de máximos diarios anuales de las distintas estaciones existentes en la provincia de Entre Ríos.
3. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.
4. Determinación del año hidrológico.
5. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
6. Verificación de las series históricas de lluvias diarias seleccionadas mediante pruebas estadísticas tales como independencia, estacionariedad y

homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.

7. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
8. Ajuste de distribución de probabilidad.
9. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
10. Comparación de los mapas obtenidos vs los mapas que obtuvo Zamanillo (2009).

Las actividades de los puntos 1, 2 están detallados en el capítulo I y II. El punto 3 lo observamos en el capítulo III. El punto 4 y 5 se ven en el capítulo III y IV, el punto 6, 7 y 8 se detallan en el capítulo IV también. Las actividades del punto 9 se realizan en el capítulo VI y el punto 10 se efectúa en el capítulo VII.

A continuación se van a ir desarrollando las actividades expresadas anteriormente.

2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, y parcialmente aleatoria. Este tipo de tratamiento es apropiado para observaciones de eventos hidrológicos extremos, como crecientes o sequías, y para información hidrológica promediada a lo largo de intervalos de tiempo grandes, como la precipitación anual (como es nuestro caso).

Los métodos estadísticos están basados en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso hidrológico, y éstos centran su atención en las observaciones mismas en lugar de ver los procesos físicos que las producen. Este capítulo describe estos principios que son los que se aplican en el análisis que se realiza a los registros de lluvias máximas diarias:

2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

El objetivo de la estadística descriptiva es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño. Las estadísticas son números calculados de una muestra los cuales resumen sus características más importantes.

Uno de los parámetros estadísticos es el valor esperado E de alguna función de una variable aleatoria. Un parámetro simple es la media μ , el valor esperado de la variable aleatoria. Para una variable aleatoria x , la media es $E(X)$, y se calcula como el producto de x y la correspondiente densidad de probabilidad $f(x)$, integrado sobre el rango factible de la variable aleatoria:

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

Ecuación 1

$E(X)$ es el primer momento alrededor del origen de la variable aleatoria, una medida del punto medio o tendencia central de la distribución. La estimación de la media sobre la base de una muestra es el promedio \bar{x} de la información de la muestra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ecuación 2

La dispersión de la información en una población se mide por medio de la varianza σ^2 , la cual es el segundo momento alrededor de la media:

$$E[(x - \mu)^2] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

Ecuación 3

El valor estimado sobre una muestra de la varianza está dado por:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Ecuación 4

en el cual el divisor es $(n - 1)$ en lugar de n para asegurar que el parámetro estadístico obtenido de la muestra no sea sesgado, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero estimado con la población. La varianza tiene dimensiones de $[X]^2$. La desviación estándar σ es una medida de la dispersión que tienen las observaciones de X . La cantidad de σ es la raíz cuadrada de la varianza y se estima por s . A medida que la desviación estándar aumenta, aumenta la dispersión de la información. El coeficiente de variación $CV = \sigma/\mu$, estimado por s/\bar{x} , es una medida adimensional de la variabilidad.

La simetría de una distribución alrededor de la media se mide utilizando la asimetría la cual es el tercer momento alrededor de la media:

$$E[(x - \mu)^3] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx$$

Ecuación 5

La asimetría normalmente se construye en forma adimensional dividiendo la Ecuación 2-16 por σ^3 para dar el coeficiente de asimetría γ :

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E[(x - \mu)^3]$$

Ecuación 6

2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS.

En esta sección se desarrollan las cuatro verificaciones que se realizan a cada una de las series de lluvias máximas diarias, para garantizar que la muestra de la que partimos es representativa, es decir, que describe las características generales de la población a la que pertenece, y que a la misma se le puede aplicar la estadística inferencial. Las verificaciones son:

- Detección de datos atípicos en la serie.
- Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).
- Prueba de Estacionariedad (Kendall).
- Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).

2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie.

Los “datos atípicos” son definidos como registros que se alejan significativamente de la tendencia observada en la muestra (suponiendo que se encuentran normalmente distribuidos). La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas.

La metodología para la detección de los datos atípicos consiste en el análisis de las series históricas de datos correspondientes a las lluvias máximas anuales de las distintas estaciones emplazadas en el territorio provincial. A dichas series se les aplicó el logaritmo neperiano procediendo a la determinación de la media \bar{y} y el desvío estándar s_y . La siguiente ecuación (aplicando la metodología propuesta por Chow -1959) de frecuencia puede utilizarse para detectar datos atípicos:

$$Y = \bar{y} \pm K_n s_y$$

Ecuación 7

Donde Y es el umbral de dato atípico alto o bajo, en unidades logarítmicas, K_n es un valor que depende del tamaño de la muestra (Tabla 1). Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que Y_s (límite superior) entonces se consideran como datos atípicos altos, análogamente en el caso de ser menores que Y_i (límite inferior) serán tomados como datos atípicos bajos.

Tamaño de muestra	K_n	Tamaño de muestra	K_n	Tamaño de muestra	K_n	Tamaño de muestra	K_n
10	2,036	24	2,467	38	2,661	60	2,837
11	2,088	25	2,486	39	2,671	65	2,866
12	2,134	26	2,502	40	2,682	70	2,893
13	2,175	27	2,519	41	2,692	75	2,917
14	2,213	28	2,534	42	2,700	80	2,940
15	2,247	29	2,549	43	2,710	85	2,961
16	2,279	30	2,563	44	2,719	90	2,981
17	2,309	31	2,577	45	2,727	95	3,000
18	2,335	32	2,591	46	2,736	100	3,017
19	2,361	33	2,604	47	2,744	110	3,049
20	2,385	34	2,616	48	2,753	120	3,078
21	2,408	35	2,628	49	2,76	130	3,104
22	2,429	36	2,639	50	2,768	140	3,129
23	2,448	37	2,65	55	2,804		

Tabla 1: Valores K_n para la prueba de datos atípicos

2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).

Una de las condiciones para poder analizar estadísticamente las series de datos es que los mismos sean aleatorios. Se busca que la probabilidad de ocurrencia de uno cualquiera de ellos no dependa de la ocurrencia de los datos que le preceden y que tampoco este influya a los datos que le siguen o datos futuros. Es decir que para el análisis estadístico se requiere que la muestra esté compuesta por datos independientes de los demás.

Una de estas pruebas estadísticas de independencia es la de secuencias de una muestra de Wald-Wolfowitz. En la misma, las hipótesis a contrastar son las siguientes:

H₀: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.

H₁: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos no es aleatorio.

En esta prueba se compara cada valor observado con la media de la muestra. Se le asigna a cada dato un término E o F (éxito o fracaso) según si el valor es mayor o menor que la media de la muestra.

Para evaluar la aleatoriedad de la muestra, se considera como estadístico de prueba al número de secuencias presente en los datos. Una secuencia se define como una serie éxitos o fracasos consecutivos. Luego en la muestra completa se puede distinguir:

R : Número de secuencias;

n₁: Número de éxitos, o de valores superiores a la media;

n₂: Número de fracasos, o de valores inferiores a la media;

n : Número de datos en la muestra

En la prueba se utiliza el valor estadístico **Z** para una prueba de dos extremos. Si **Z** es mayor o igual al valor crítico superior, o menor o igual al valor crítico inferior, la hipótesis nula de aleatoriedad puede ser rechazada al nivel de significancia α . Sin embargo, si **Z** se encuentra entre estos límites, la hipótesis nula de aleatoriedad puede aceptarse. El valor estadístico **Z** se determina de la siguiente manera:

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R^2}$$

Ecuación 8

Dónde:

$$\mu_R = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{n} + 1$$

Ecuación 9

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(\mu_R - 1)(\mu_R - 2)}{n - 1}}$$

Ecuación 10

El valor del estadístico Z_L , se contrasta con el valor de tabla de la distribución normal para un cierto nivel de significancia establecido.

2.2.3. Prueba de Estacionariedad (Kendall).

Mediante la prueba estadística de estacionariedad de Kendall se busca que en la serie de datos no se presente una tendencia temporal. Para cada dato de la serie, la cual se encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuantos datos posteriores son superiores (**S**). De esta forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s(i)$$

Ecuación 11

En donde **s(i)** es el número de los valores en la serie tal que $X_j > X_i$, siendo $i < j \leq n$. Por otro lado se determinan cuantos valores posteriores son menores (**T**)(T). Los mismos se determinan de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} t(i)$$

Ecuación 12

En donde **t(i)** es el número de valores en la serie tal que $X_j < X_i$, siendo $i < j \leq n$. Con los valores de **S** y **T** calculados con las Ecuaciones 2-5 y 2-6, se define el índice $I = S - T$, que debe ser próximo a cero si la hipótesis nula es verdadera.

Por lo tanto se deben verificar las siguientes condiciones:

- $I < I_{cri}(\alpha)$, o sea que el I calculado sea menor que un valor de I crítico tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.

- Para tamaños de muestra mayores a 10, el valor del estadístico se aproxima a una distribución normal. Por lo que se debe utilizar una forma estandarizada del estadístico en donde se transforma el índice I en el índice K , definido como:

$$K = \frac{I - 1}{\left(\frac{N * (N - 1) * (2N + 5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I > 0$$

$$K = 0 \quad I = 0$$

$$K = \frac{I + 1}{\left(\frac{N * (N - 1) * (2N + 5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I < 0$$

$$K = \frac{I + 1}{\left(\frac{N * (N - 1) * (2N + 5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I < 0$$

Ecuación 13

Los valores de K_{cri} son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la Tabla 2.

Nivel de significancia	0,01	0,05	0,1
K_{cri}	2,33	1,64	1,28

Tabla 2: Valores de K_{cri} para el test de Kendall

2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para efectuar esta prueba se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños N_1 y N_2 , por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las $N = N_1 + N_2$ observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más, de modo que el rango N queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon T_1 , es simplemente la suma de los rangos asignados a las n 1 observaciones de la muestra más pequeña. Para cualquier valor entero n , la suma de los n primeros enteros consecutivos pueden calcularse fácilmente como

$N(N+1)/2$. La estadística de prueba T_1 , más la suma de los rangos asignados a los N_2 elementos de la segunda muestra, T_2 , por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir:

$$T_1 + T_2 = \frac{N(N+1)}{2}$$

Ecuación 14

De modo que esta ecuación puede ser empleada como verificación del procedimiento de asignación de rangos.

La prueba de la hipótesis nula puede ser de dos extremos o de un extremo, dependiendo de si se está probando si los dos promedios de población son exclusivamente diferentes o si una es mayor que la otra.

La estadística de prueba, T_1 , está distribuida de manera aproximadamente normal. Se puede emplear la siguiente fórmula de aproximación de muestra grande para probar la hipótesis nula:

$$|Z| = \frac{T_1 - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1}}$$

Ecuación 15

El valor medio de la estadística de prueba T_1 , puede calcularse con:

$$\mu_{T_1} = \frac{n_1(n+1)}{2}$$

Ecuación 16

y la desviación estándar de la estadística de prueba T_1 , se puede calcular con:

$$\sigma_{T_1} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n+1)}{12}}$$

Ecuación 17

Basándose en α , el nivel de significación seleccionado, la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor Z calculado cae en la región de rechazo apropiada.

2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

La estadística inferencial estudia la población a partir del estudio de una muestra, y el grado de fiabilidad o significación de los resultados obtenidos. En esta sección del informe se desarrolla:

- Función de distribución de probabilidad empírica.
- Ajuste de función de distribución de probabilidad.
- Ajuste por el Método de Momentos.

- Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.
- Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.

En la naturaleza, la mayoría de los fenómenos hidrológicos constituyen procesos aleatorios y dado que la planificación y el diseño están basados en eventos futuros, cuya magnitud y tiempo de ocurrencia no pueden predecirse, se debe recurrir al estudio de las probabilidades o frecuencias con que un determinado evento puede ser igualado o excedido.

Weibull estableció que la probabilidad de excedencia (porcentaje de veces durante el cual un determinado evento es igual o mayor a la cantidad indicada) de un evento dado se corresponde con la siguiente expresión:

$$p = \frac{m}{(N + 1)}$$

Ecuación 18

Donde **N** corresponde al número total de datos de una serie (años de registro) y **m** representa el número de orden de la serie arreglada en forma creciente.

2.3.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad.

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante un ajuste de una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información estadística de la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados.

2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos.

Fue desarrollado por Karl Pearson, (1902). Él consideró que unos buenos estimadores de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes de la información de la muestra.

Si a cada uno de los valores de la información se le asigna una masa hipotética igual a su frecuencia relativa de ocurrencia ($1/n$) y si se imagina que este sistema de masas rota alrededor del origen $xx = 0$, entonces el primer momento de cada observación xix_i alrededor del origen es el producto de su brazo de momento xix_i y de su masa $1/n$, y la suma de estos momentos para toda la información es la media de la muestra.

$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$$

Ecuación 19

Esto es equivalente al centroide de un cuerpo. El centroide correspondiente de la función de probabilidad es:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

Ecuación 20

El segundo y el tercer momento en la distribución de probabilidad pueden igualarse a los valores de la muestra para determinar los valores de los parámetros de la distribución de probabilidad. Originalmente Pearson consideró solamente momentos alrededor del origen, pero posteriormente se volvió común el uso de la varianza como el segundo momento central, $\sigma^2 = E [(x-\mu)^2]$, y el coeficiente de asimetría como el tercer momento central estandarizado, $\gamma = E [(x-\mu)^3] / \sigma^3$, para determinar el segundo y el tercer parámetro de la distribución si se requería.

2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.

Fue desarrollado por Fisher, (1922). Él razonó que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. Si se supone que el espacio muestral se divide en intervalos de longitud dx y se toma una muestra de observaciones independientes e idénticamente distribuidas x_1, x_2, \dots, x_n . El valor de la densidad de probabilidad para $\mathbf{X} = \mathbf{x}_i$ es $f(\mathbf{x}_i)$, y la probabilidad de que la variable aleatoria ocurra en el intervalo que incluye \mathbf{x}_i es $f(\mathbf{x}_i)dx$. Debido a que las observaciones son independientes (verifican de acuerdo a hipótesis de sección 2.1.2), su probabilidad de ocurrencia conjunta está dada por la Ecuación 2-19. Como el producto:

$$f(x_1)dx f(x_2)dx \dots f(x_n)dx = \left[\prod_{i=1}^n f(x_i) \right] dx^n$$

Ecuación 21

Y puesto que el tamaño del intervalo dx es fijo, el maximizar la probabilidad conjunta de la muestra observada es equivalente a maximizar la función de verosimilitud:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i)$$

Ecuación 22

Debido a que muchas funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, algunas veces es conveniente trabajar con la función logaritmo de la verosimilitud:

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln [f(x_i)]$$

Ecuación 23

El método de la máxima verosimilitud teóricamente es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a información en el sentido de que produce los estimativos de parámetros más eficientes, ya que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio. Pero, para algunas distribuciones de probabilidad, no existe solución analítica para todos los parámetros en términos de las estadísticas de la muestra y la función logaritmo de verosimilitud debe maximizarse numéricamente, lo cual puede ser bastante difícil.

2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

El periodo de retorno **T** de un evento puede definirse como el intervalo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. El mismo, puede considerarse como la inversa de la probabilidad de ocurrencia de un evento de igual o mayor magnitud de un evento crítico.

$$P(X \geq x_t) = \frac{1}{T}$$

Ecuación 24

Este concepto es muy utilizado en el diseño hidrológico. En el diseño hidrológico existen tres enfoques para decidir el periodo de retorno óptimo: una aproximación empírica, un análisis del riesgo asumido o un análisis hidroeconómico. Los dos primeros evalúan la amenaza en si mientras que el último tiene en cuenta también la vulnerabilidad del sistema y considera el riesgo en su conjunto.

En cuanto al método empírico tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia **P (np, nd, no)** de que en np años de predicción futuros se alcance o se supere la magnitud del evento crítico, de duración nd años, medido en no años de observación precedentes.

$$P(n_p, n_d, n_o) = \frac{n_p - n_d + 1}{(n_o - n_d + 1) + (n_p - n_d + 1)}$$

$$P(n_p, n_d, n_o) = \frac{n_p - n_d + 1}{n_o + n_p - 2 * n_d + 2}$$

Ecuación 25

Cuando el evento critico persiste menos de un año puede considerarse $n_d=1$. Luego la Ecuación 2-23 queda:

$$P(n_p, n_o) = \frac{n_p}{n_o + n_p}$$

Ecuación 26

En el análisis hidroeconómico se determina el tiempo de retorno de manera tal que los costos totales sean mínimos. Para la determinación de los costos totales se debe tener en cuenta que si bien al aumentar el periodo de retorno se reducen los costos o riesgos ante una falla, la magnitud y costo de una obra se ven incrementadas; para este método la cantidad de información necesaria es mucho mayor que para los demás. En la Tabla 3 se presentan rangos de valores usualmente seleccionados de periodos de retorno para el diseño de estructuras de control en las que se ven implicados fenómenos hidrológicos.

Tipo de Estructuras	Periodo de Retorno (años)
Alcantarillas	
Volúmenes de tráfico bajos	05-Oct
Volúmenes de tráfico medios	10 - 25
Volúmenes de tráfico altos	50 - 100
Puentes	
Sistema secundario	5 - 50
Sistema primario	50 - 100
Drenaje urbano	
Alcantarillas pequeñas	2 - 25
Alcantarillas grandes	25 - 50

Tabla 3: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994)

3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA.

3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA.

Se recopiló información de lámina de lluvia diaria de las estaciones pluviométricas instaladas en la provincia de Entre Ríos.

Esta información se obtuvo de dos grandes fuentes: por un lado 61 estaciones pluviométricas se obtuvieron de la base de datos empleada por Zamanillo en el trabajo que realizó en 2009 y por otro lado se recopilaron datos históricos de diferentes fuentes pertenecientes a entidades gubernamentales, tales como:

<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>

<http://dev.sia.gov.ar/series>

<http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>

<http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>

Además de recopilar los datos de las estaciones de la provincia de Entre Ríos, también se buscaron datos históricos de precipitación existentes en la provincia de Buenos Aires y la República Oriental del Uruguay, para de esta manera contar con información en los bordes (recordar que en los casos de Santa Fe y Corrientes ya se contaba con datos pluviométricos de trabajos anteriores –ver sección 1.1.1. de este trabajo).

3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.

En el presente trabajo se determinaron las láminas de lluvia máximas para distintos períodos de retorno, $T = 2, 5, 10, 20, 25, 50$ y 100 años. No se realiza el análisis para un período de retorno mayor ya que la bibliografía aconseja que la cantidad de años en los cuales se puede realizar una extrapolación confiable es igual a cinco veces la longitud de la serie de la muestra; es decir, para un registro de 20 años por ejemplo, puede realizarse una extrapolación confiable de hasta 100 años.

El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar.

Teniendo en cuenta estudios similares realizados en provincias vecinas, para homogeneizar el análisis realizado en nuestra región de estudio, se adoptó un criterio menos restrictivo. Se decidió la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o

igual a catorce años, utilizándose de esta manera el total de las estaciones de las cuales tenemos datos.

En la Tabla 4 y en la Figura 6 se puede observar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, entre catorce y veinte y mayor o igual de veinte. Aquellas estaciones con más de catorce años de registro son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Longitud de serie – Entre Ríos		
Estaciones con datos	67	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	0	0%
Longitud de serie >= 14	67	100%
Longitud de serie >= 20	67	100%

Tabla 4: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Entre Ríos en función de su longitud de serie

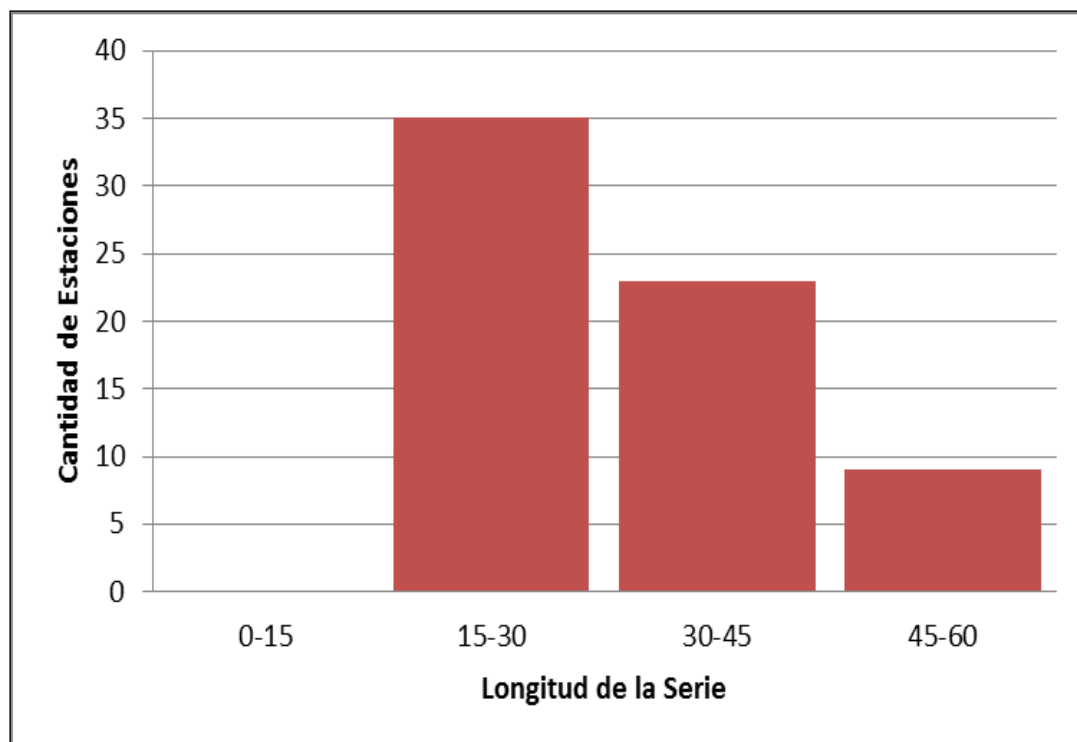


Figura 6: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Entre Ríos

3.3. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.

En la Tabla 5 se muestran las estaciones seleccionadas en primera instancia para la provincia de Entre Ríos (y alrededores) y en la Figura 7 la localización de las estaciones.

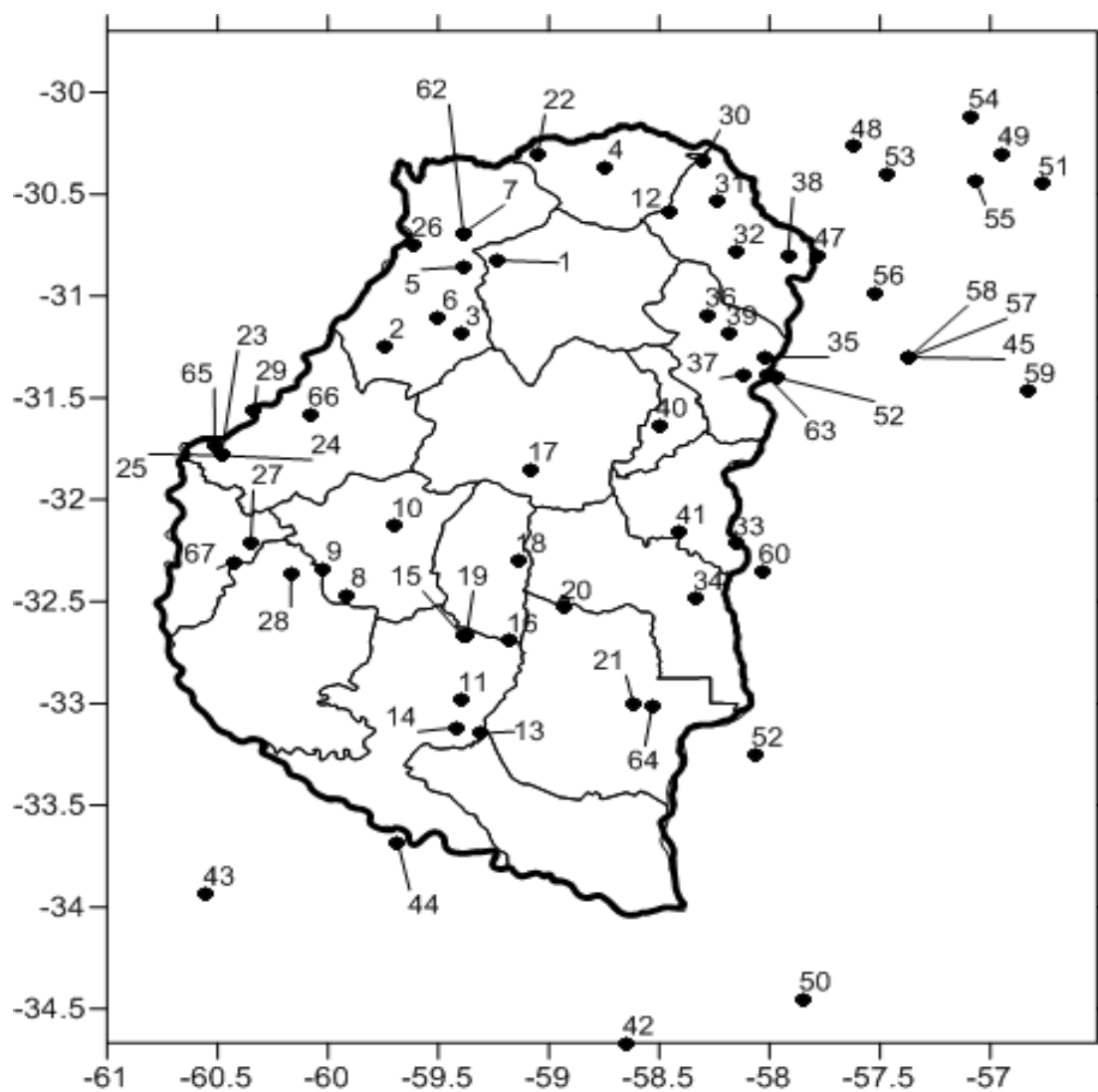


Figura 7: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Entre Ríos

REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

ID Org.	Código	Nombre de la estación	Provincia	Serie	Latitud	Longitud
1	1	Banderas	Entre Ríos	46	-30.825	-59.234
2	2	Colonia Avigdor	Entre Ríos	44	-31.245	-59.745
3	3	El Carmen Yeso Oeste	Entre Ríos	47	-31.184	-59.401
4	4	San Gustavo	Entre Ríos	48	-30.367	-58.750
5	5	Pedro Vallejos	Entre Ríos	46	-30.857	-59.379
6	6	La Lila	Entre Ríos	26	-31.106	-59.503
7	7	Feliciano	Entre Ríos	20	-30.691	-59.387
8	8	Febre	Entre Ríos	36	-32.467	-59.917
9	9	Hernández	Entre Ríos	59	-32.338	-60.027
10	10	Crucesitas III	Entre Ríos	47	-32.127	-59.699
11	11	González Calderón	Entre Ríos	41	-32.983	-59.400
12	12	Los Conquistadores (SG)	Entre Ríos	25	-30.583	-58.450
13	13	Gualeguay	Entre Ríos	23	-33.147	-59.314
14	14	La Lila	Entre Ríos	22	-33.118	-59.422
15	15	Los Pinos	Entre Ríos	24	-32.671	-59.389
16	16	Valdegovia	Entre Ríos	23	-32.692	-59.176
17	17	Villaguay AERO	Entre Ríos	27	-31.850	-59.083
18	18	Rosario del Tala	Entre Ríos	26	-32.299	-59.139
19	19	La Matilde	Entre Ríos	23	-32.669	-59.373
20	20	Gilbert	Entre Ríos	49	-32.530	-58.932
21	21	Guauguaychú Aero	Entre Ríos	38	-33.000	-58.617
22	22	Esc. N° 9Chañar-Policia	Entre Ríos	24		
23	23	Paraná AERO	Entre Ríos	38	-31.783	-60.483
24	24	Paraná DPH	Entre Ríos	50	-31.783	-60.483
25	25	Paraná INTA	Entre Ríos	35	-31.783	-60.483
26	26	La Paz	Entre Ríos	44	-30.747	-59.607
27	27	Isletas CR	Entre Ríos	46	-32.217	-60.350
28	28	Hinojal CR	Entre Ríos	25	-32.367	-60.167
29	29	Chapetón	Entre Ríos	27	-31.567	-60.333
30	30	Pueblo San Jaime	Entre Ríos	38	-30.333	-58.300
31	31	Sta. Maria de Tatuti	Entre Ríos	26	-30.533	-58.233
32	32	Chajari	Entre Ríos	25	-30.783	-58.150
33	33	Colón	Entre Ríos	36	-32.217	-58.150
34	34	Concepción del Uruguay INTA	Entre Ríos	38	-32.483	-58.333
35	35	Concordia AERO	Entre Ríos	37	-31.300	-58.017
36	36	El Redomón	Entre Ríos	24	-31.092	-58.277
37	37	El Yuqueri	Entre Ríos	31	-31.383	-58.117
38	38	La Estrella	Entre Ríos	26	-30.800	-57.917
39	39	Los Charruas	Entre Ríos	31	-31.181	-58.183
40	40	San Salvador	Entre Ríos	41	-31.633	-58.500
41	41	Villa Elisa CR	Entre Ríos	22	-32.158	-58.408
42	42	Castelar INTA	Buenos Aires	36	-34.667	-58.650
43	43	Pergamino INTA	Buenos Aires	37	-33.933	-60.550
44	44	San Pedro INTA	Buenos Aires	38	-33.683	-59.683
45	45	Arerungua	R.O.Uruguay	24	-31.300	-57.367
46	46	Artigas	R.O.Uruguay	25	-30.400	-56.517
47	47	Belén	R.O.Uruguay	24	-30.800	-57.783
48	48	Bella Unión	R.O.Uruguay	24	-30.267	-57.617
49	49	Bnbe. Rivera	R.O.Uruguay	25	-30.300	-56.950
50	50	Colonia	R.O.Uruguay	35	-34.450	-57.850
51	51	Jav. De Viana	R.O.Uruguay	25	-30.450	-56.767
52	52	Mercedes	R.O.Uruguay	34	-33.250	-58.067
53	53	T. Gomensoro	R.O.Uruguay	25	-30.400	-57.467
54	54	Po. Del León	R.O.Uruguay	25	-30.117	-57.083
55	55	Paso Fariás	R.O.Uruguay	25	-30.433	-57.067
56	56	Term. Arapey	R.O.Uruguay	25	-30.983	-57.517
57	57	Valentín	R.O.Uruguay	25	-31.300	-57.367
58	58	Arerungua	R.O.Uruguay	24	-31.300	-57.367
59	59	Po. Potrero	R.O.Uruguay	25	-31.467	-56.833
60	60	Paysandú	R.O.Uruguay	35	-32.350	-58.033
61	52	Salto	R.O.Uruguay	25	-31.400	-57.967
62	62	Feliciano	Entre Ríos	23	-30.691	-59.387
63	63	Concordia	Entre Ríos	43	-31.391	-58.014
64	64	Guauguaychu	Entre Ríos	44	-33.017	-58.532
65	65	Paraná	Entre Ríos	44	-31.738	-60.513
66	66	A° Las Conchas	Entre Ríos	25	-31.579	-60.076
67	67	Del Doll	Entre Ríos	23	-32.306	-60.427

Tabla 5: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Entre Ríos (longitud de registro > 14 años)

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA.

En el presente capítulo, en base a los registros pluviométricos de una estación ejemplo elegida, se realiza el análisis estadístico completo descrito en el capítulo II.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR.

A modo de ejemplo, se presenta el análisis estadístico completo de los registros de lluvia diaria de la estación Hernández (código interno 9) localizada en la provincia de Entre Ríos. Se elige esta serie por ser la más larga en cuanto a longitud de registro de datos que se ha utilizado en el análisis (59 años). En forma similar se analizaron las otras 66 estaciones de esta provincia.

En la Tabla 6 se puede apreciar la forma en que se proporcionaron los datos de la estación Hernández; y se observa que se partió en este caso de las láminas de lluvia máximas diarias de cada año hidrológico.

Para el análisis de los datos se creó, en Excel, una “Planilla Modelo” (que a su vez fue utilizada para el resto de las estaciones) que contiene 3 pestañas específicas. Al inicio de la primera de ellas (llamada “Datos Básicos”) se debe dejar asentados los datos de la estación, como son:

- El año de inicio de la recolección de dichos datos.
- Nombre de la estación.
- Coordenadas y ubicación.
- Provincia.
- Código interno asignado a la estación.

Siguiendo con el análisis de la estación Hernández (que será analizada a modo de ejemplo en forma completa en este capítulo), en la Figura 8, se presenta la evolución temporal de los máximos valores anuales de lluvia diaria en función del año en que se registró el evento para la estación Hernández. Los registros cuentan con 59 años de longitud, siendo el más extenso de todas las series registradas.

ESTACIÓN: HERNANDEZ	
MAXIMOS ANUALES	
Fecha	Precipitación max. 1 día (mm)
1945	113.5
1946	102
1947	87
1948	135
1949	114
1950	85
1951	122
1952	45
1953	95
1954	111
1956	112
1957	73
1958	90
1959	93
1960	115
1961	115
1962	57
1963	72
1964	94
1965	137
1966	109
1967	73
1968	70
1969	61
1970	80
1971	91
1972	145
1973	110
1974	65
1975	285
1976	65
1977	45
1978	125
1979	151
1980	60
1981	85
1982	75
1983	128
1984	129
1985	85
1986	90
1987	75
1988	145
1989	140
1990	85
1991	105
1992	114
1993	130
1994	130
1995	112
1996	111
1997	71
1999	155
2000	225
2001	91
2002	111
2003	61
2004	60
2005	100

Tabla 6: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos

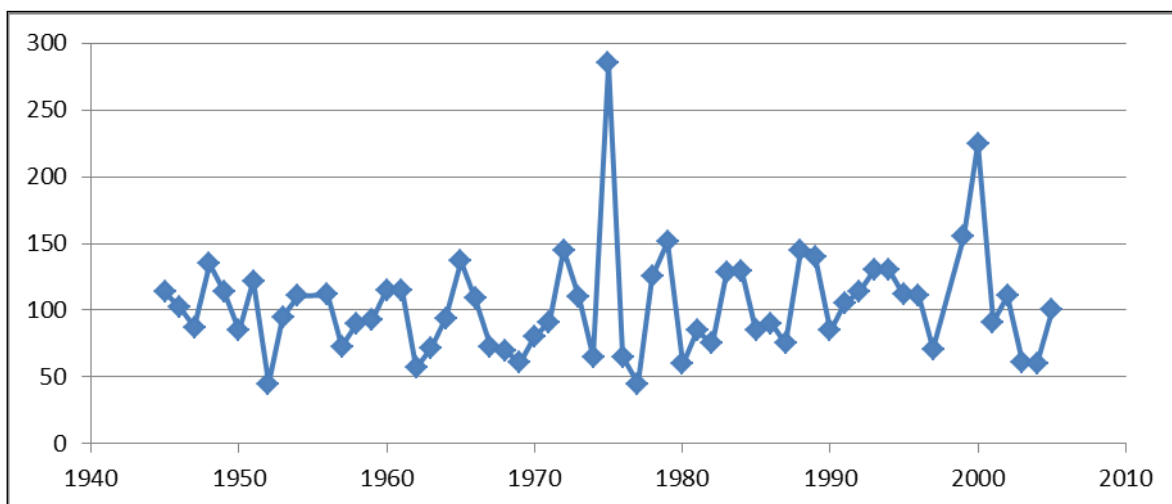


Figura 8: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación de Hernández en la Provincia de Entre Ríos

4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

El procedimiento del análisis descriptivo de datos con Hyfran puede resumirse en:

- a) La pestaña “Descripción” (Figura 9) se coloca el número y nombre de la estación como “Titulo del Proyecto”; se borran los comentarios, se coloca “PMDA” en el nombre de la variable, “mm” en unidad y “5” en números significativos. En formula de probabilidad empírica se selecciona 0.00, correspondiente a la Formula de Weibull.
- b) En la pestaña “Datos” se copian los años con datos de lluvia máxima anual (eliminando datos atípicos), teniendo en cuenta de cambiar las “,” por “.” ya que es el formato a introducir en el programa Hyfran y se borran los datos excedentes. Los datos obtenidos (Observaciones, Identificador y Probabilidad empírica) se copian y se pegan en la segunda pestaña de la Planilla Modelo construída en Excel, siendo ésta, “Hyfran Muestra” (Figura 10 y Tabla 7). En la Tabla 7 se pueden observar de manera completa los datos con las probabilidades empíricas de no excedencia, no así en la Figura 10.
- c) Se selecciona la pestaña “Estadística de Base”, la cual nos proporciona los datos estadísticos correspondientes a los valores mínimos, máximos, mediana, desvío estándar y coeficientes de asimetría, variación y curtosis (Figura 11).

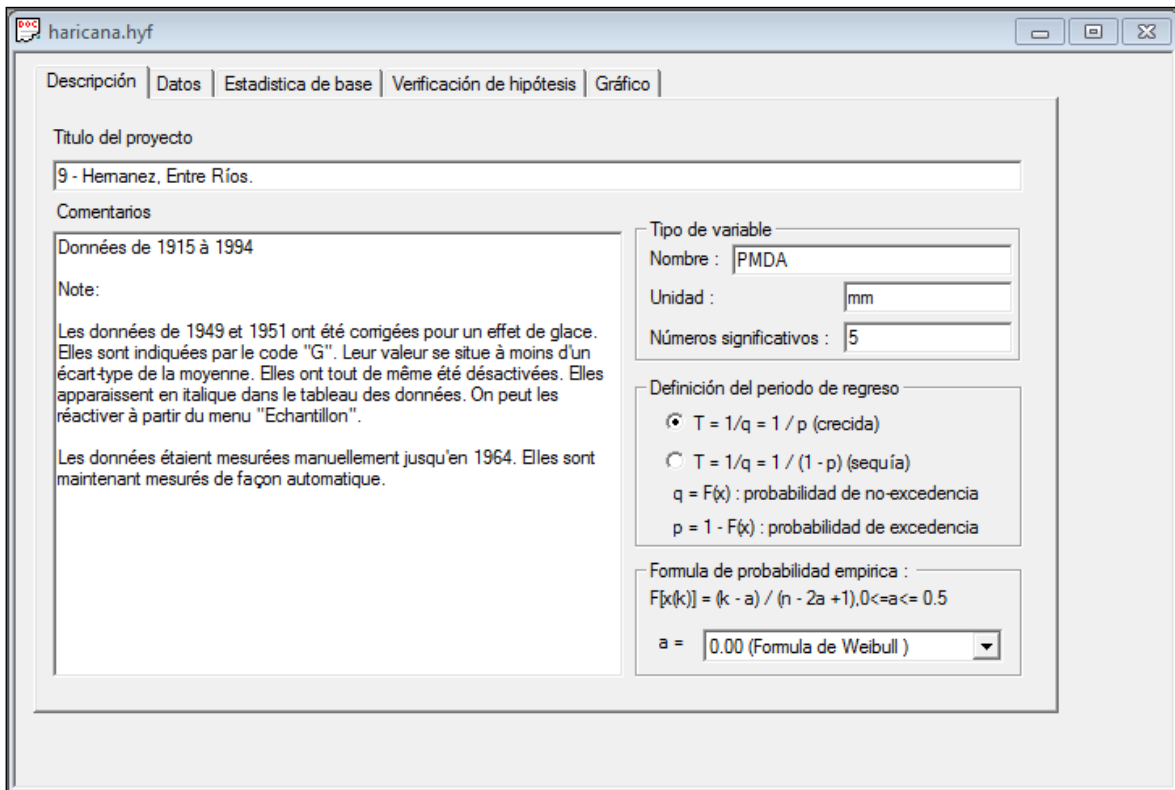


Figura 9: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación

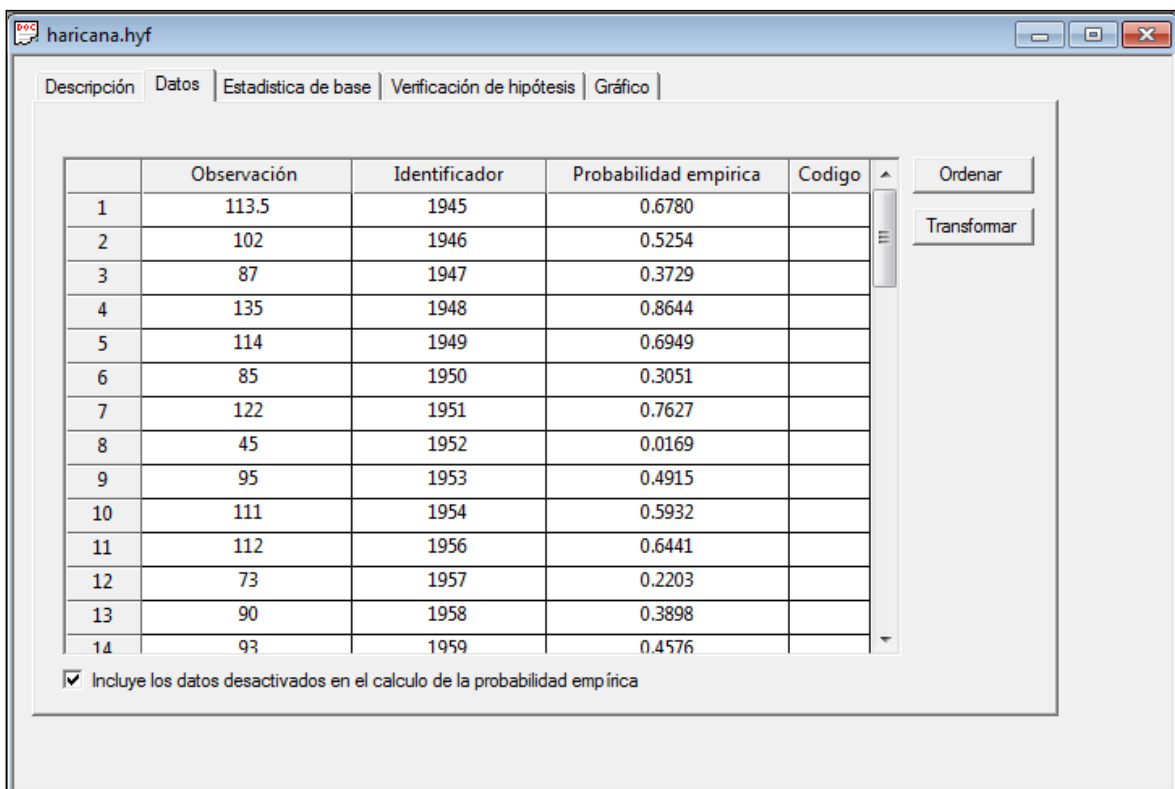


Figura 10: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

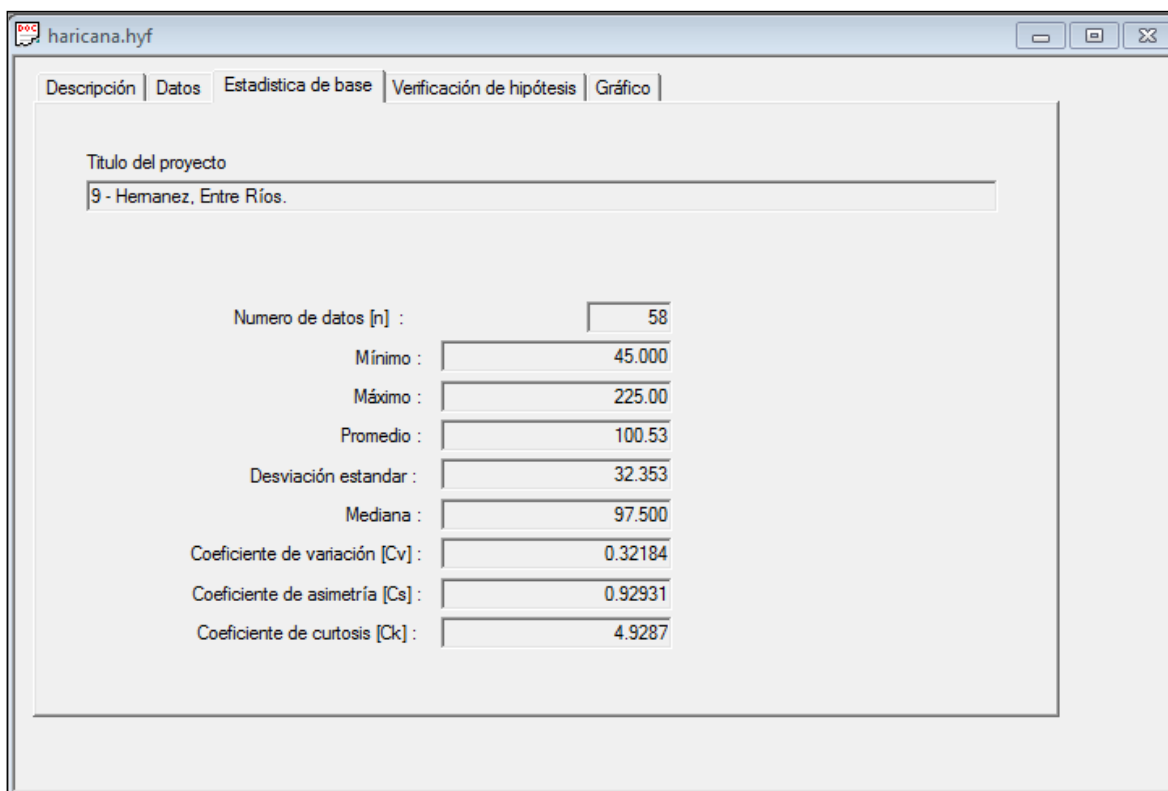


Figura 11: Salida de Estadística Base de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

Observacion	Identificacion	Probabilidad empirica
113.5	1945	0.678
102	1946	0.5254
87	1947	0.3729
135	1948	0.8644
114	1949	0.6949
85	1950	0.3051
122	1951	0.7627
45	1952	0.0169
95	1953	0.4915
111	1954	0.5932
112	1956	0.6441
73	1957	0.2203
90	1958	0.3898
93	1959	0.4576
115	1960	0.7288
115	1961	0.7458
57	1962	0.0508
72	1963	0.2034
94	1964	0.4746
137	1965	0.8814
109	1966	0.5593
73	1967	0.2373
70	1968	0.1695
61	1969	0.1017
80	1970	0.2881
91	1971	0.4237
145	1972	0.9153
110	1973	0.5763
65	1974	0.1356
65	1976	0.1525
45	1977	0.0339
125	1978	0.7797
151	1979	0.9492

60	1980	0.0678
85	1981	0.322
75	1982	0.2542
128	1983	0.7966
129	1984	0.8136
85	1985	0.339
90	1986	0.4068
75	1987	0.2712
145	1988	0.9322
140	1989	0.8983
85	1990	0.3559
105	1991	0.5424
114	1992	0.7119
130	1993	0.8305
130	1994	0.8475
112	1995	0.661
111	1996	0.6102
71	1997	0.1864
155	1999	0.9661
225	2000	0.9831
91	2001	0.4407
111	2002	0.6271
61	2003	0.1186
60	2004	0.0847
100	2005	0.5085

Tabla 7: Probabilidad empírica de la no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS HIDROLÓGICOS.

4.3.1. Detección de datos atípicos.

Los datos atípicos en la serie se detectan utilizando la metodología presentada en la sección 2.2.1. En la Tabla 8 se observa el test realizado implementando el uso de las herramientas de Excel en la serie de la estación pluviométrica Hernández. En este caso se detectó un solo dato atípico el cual se elimina y luego se vuelve a realizar el análisis, si en este último caso la prueba verifica entonces se continúa con el procedimiento.

REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

n	Prec. Max diaria anual	Año	LnMax	Datos Atipicos	Completa (x-media)^2	Trunca (x-media)^2
1	113.5	1945	4.732	VERIFICA	96.97	168.33
2	102	1946	4.625	VERIFICA	2.73	2.17
3	87	1947	4.466	VERIFICA	277.31	182.95
4	135	1948	4.905	VERIFICA	982.66	1188.47
5	114	1949	4.736	VERIFICA	107.07	181.55
6	85	1950	4.443	VERIFICA	347.92	241.05
7	122	1951	4.804	VERIFICA	336.63	461.14
8	45	1952	3.807	VERIFICA	3440.12	3083.12
9	95	1953	4.554	VERIFICA	74.87	30.54
10	111	1954	4.710	VERIFICA	53.99	109.71
11	112	1956	4.718	VERIFICA	69.68	131.66
12	73	1957	4.290	VERIFICA	939.58	757.67
13	90	1958	4.500	VERIFICA	186.39	110.79
14	93	1959	4.533	VERIFICA	113.48	56.64
15	115	1960	4.745	VERIFICA	128.76	209.50
16	115	1961	4.745	VERIFICA	128.76	209.50
17	57	1962	4.043	VERIFICA	2176.46	1894.50
18	72	1963	4.277	VERIFICA	1001.88	813.72
19	94	1964	4.543	VERIFICA	93.17	42.59
20	137	1965	4.920	VERIFICA	1112.05	1330.36
21	109	1966	4.691	VERIFICA	28.60	71.81
22	73	1967	4.290	VERIFICA	939.58	757.67
23	70	1968	4.248	VERIFICA	1132.49	931.83
24	61	1969	4.111	VERIFICA	1819.24	1562.29
25	80	1970	4.382	VERIFICA	559.44	421.31
26	91	1971	4.511	VERIFICA	160.09	90.74
27	145	1972	4.977	VERIFICA	1709.61	1977.95
28	110	1973	4.700	VERIFICA	40.29	89.76
29	65	1974	4.174	VERIFICA	1494.02	1262.09
30	285	1975	5.652	NO VERIFICA	32886.90	34030.71
31	65	1976	4.174	VERIFICA	1494.02	1262.09
32	45	1977	3.807	VERIFICA	3440.12	3083.12
33	125	1978	4.828	VERIFICA	455.71	598.98
34	151	1979	5.017	VERIFICA	2241.78	2547.64
35	60	1980	4.094	VERIFICA	1905.54	1642.35
36	85	1981	4.443	VERIFICA	347.92	241.05
37	75	1982	4.317	VERIFICA	820.97	651.57
38	128	1983	4.852	VERIFICA	592.80	754.83
39	129	1984	4.860	VERIFICA	642.49	810.78
40	85	1985	4.443	VERIFICA	347.92	241.05
41	90	1986	4.500	VERIFICA	186.39	110.79
42	75	1987	4.317	VERIFICA	820.97	651.57
43	145	1988	4.977	VERIFICA	1709.61	1977.95
44	140	1989	4.942	VERIFICA	1321.14	1558.21
45	85	1990	4.443	VERIFICA	347.92	241.05
46	105	1991	4.654	VERIFICA	1.82	20.02
47	114	1992	4.736	VERIFICA	107.07	181.55
48	130	1993	4.868	VERIFICA	694.19	868.72
49	130	1994	4.868	VERIFICA	694.19	868.72
50	112	1995	4.718	VERIFICA	69.68	131.66
51	111	1996	4.710	VERIFICA	53.99	109.71
52	71	1997	4.263	VERIFICA	1066.19	871.78
53	155	1999	5.043	VERIFICA	2636.56	2967.43
54	225	2000	5.416	VERIFICA	14725.21	15493.81
55	91	2001	4.511	VERIFICA	160.09	90.74
56	111	2002	4.710	VERIFICA	53.99	109.71
57	61	2003	4.111	VERIFICA	1819.24	1562.29
58	60	2004	4.094	VERIFICA	1905.54	1642.35
59	100	2005	4.605	VERIFICA	13.34	0.28
Promedio	103.65	Media Ln	4.5789		93117.13	93693.92
Desvío est.	40.07	Desvío Ln	0.3496		40.07	40.19
Máximo	285	K	2.837			
		Yh	5.5707	Promedio n-1 =		100.53
		Yl	3.5870	Desvío est. n-1 =		32.35

Tabla 8: Planilla resumen de datos pluviométricos

4.3.2. Prueba de Independencia.

Luego de realizada la prueba de datos atípicos, se procede a realizar la verificación de las otras hipótesis estadísticas detalladas en la sección 2.1 a través del programa Hyfran; el mismo puede describirse como un software que permite ajustar datos a leyes estadísticas. Incluye un conjunto de instrumentos matemáticos, accesibles y flexibles que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos (máximos o mínimos).

La prueba de independencia de Wald-Wolfowitz, detallada en la sección 2.2.2, permite verificar la existencia de una auto-correlación significativa de primer orden entre las observaciones. En la Figura 12 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión.

haricana.hyf

Descripción | Datos | Estadística de base | **Verificación de hipótesis** | Gráfico

Nombre de la prueba: Prueba de independencia (Wald-Wolfowitz).

Título del proyecto: 9 - Hernanez, Entre Ríos.

Hipótesis

H0: Las observaciones son independientes.

H1: Las observaciones son dependientes (autocorrelación alrededor de 1).

Resultados

Valor de la estadística	U = 1.5722
valor-p	p = 0.11590

Conclusión

Aceptamos H0. a un nivel de significado de 5 %.

Figura 12: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

Se puede observar que verifica la prueba de Independencia con un nivel de significancia del 12 %. El nivel de significación de un test es un concepto estadístico asociado a la verificación de una hipótesis. En pocas palabras, se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I, o "falso positivo"). La decisión se toma a menudo utilizando el valor P (o p-valor): si el valor P es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor P, más significativo será el resultado.

4.3.3. Prueba de Estacionariedad.

La prueba de estacionariedad de Kendall (detallada en la sección 2.2.3) permite verificar si existe una tendencia importante en la serie. En la Figura 13 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión. Se puede observar que verifica la prueba de Estacionariedad con un nivel de significancia del 60%.

haricana.hyf

Descripción | Datos | Estadística de base | Verificación de hipótesis | Gráfico

Nombre de la prueba: Prueba de estacionariedad (Kendall).

Título del proyecto: 9 - Hernanez, Entre Ríos.

Hipótesis

H0: No hay tendencia en las observaciones.

H1: Hay una tendencia en las observaciones.

Resultados

Valor de la estadística	K = 0.52322
valor-p	p = 0.60084

Conclusión

Acceptamos H0, a un nivel de significado de 5%.

Figura 13: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionariedad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

La prueba de homogeneidad del promedio a escala anual de Wilcoxon (detallada en la sección 2.2.4) permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para esta estación se definió la fecha final del primer grupo al año 1974 a partir del análisis de la Figura 8.

El primer subgrupo se compone de las observaciones que comienzan con el primer año y terminan con un año de corte (1974), el segundo subgrupo está integrado a partir del año siguiente al año de corte hasta las observaciones finales. En la Figura 14 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión, se puede observar que verifica la prueba de Homogeneidad con un nivel de significancia del 41%.

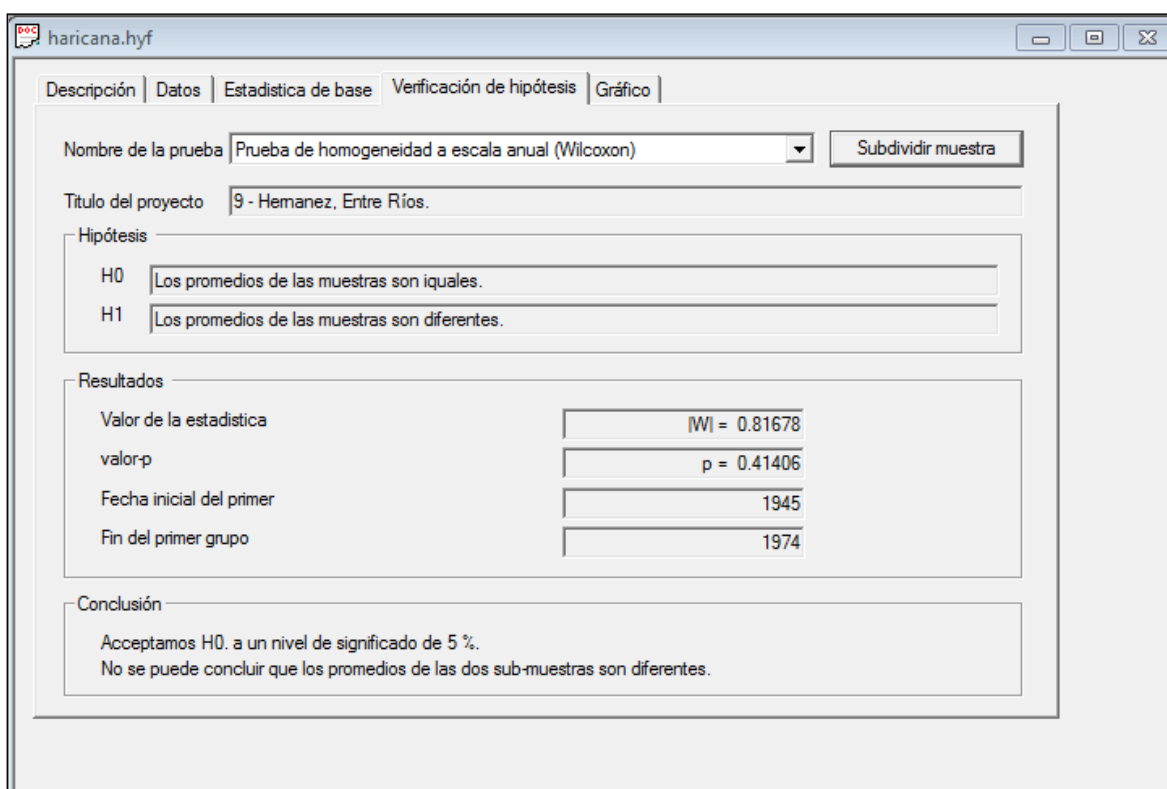


Figura 14: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

En esta última parte del capítulo se analiza la muestra habiendo verificado todos los puntos anteriores, como una población (detallada en el capítulo II en el punto 2.3).

4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad.

Las funciones de distribución y métodos de ajuste ensayados fueron:

- GEV (Método de Max. Verosimilitud).
- Gumbel (Método de Max. Verosimilitud).
- LogNormal (Método de Max. Verosimilitud).
- GEV (Método de Momentos).
- Gumbel (Método de Momentos).
- LogPearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina, es que se busca adoptar una misma función de distribución de probabilidades para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales; se optó por la función LogNormal, que coincide con la estimación por el método de las normales. Se realizó un análisis de sensibilidad a esta decisión al comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos. Esto se muestra al final del capítulo.

Los ajustes antes mencionados se realizaron con el software Hyfran. Para ello, debía seleccionarse la pestaña “Ajuste” y elegir el método a utilizar, pudiendo ser “Método de Momentos” o “Método de Máxima Verosimilitud” y en algunos casos con método de momentos ponderados (esta última opción no fue seleccionada en ningún caso). En la Figura 15 y la Figura 16 se demuestra el procedimiento descripto.

Al realizar los ajustes, el programa, por defecto, selecciona 12 periodos de retorno diferentes (10.000, 2.000, 1.000, 200, 100, 50, 20, 5, 3, 2, 1.43) para realizar la estimación de láminas de lluvia diaria y sus intervalos de confianza. Además se incorporó manualmente el periodo de retorno de 25 años. Esto se llevaba a cabo seleccionando la pestaña “Otro periodo de regreso” y tipiendo el valor a asignar (Figura 17).

Los resultados del análisis inferencial se copian y pegan en la tercera pestaña de la “Planilla Modelo”, siendo esta denominada “Hyfran Población”. Este procedimiento se realizó conjuntamente con el gráfico que muestra las lluvias máximas diarias (P (mm)) para cada periodo de retorno (Probabilidad de no-excedencia) y los intervalos de confianza. Además se realizó un test de “adecuación” de la distribución de probabilidades ensayadas a la muestra analizada. Este procedimiento se realizó para cada una de las opciones de función de distribución y modelo de ajuste seleccionado (Figura 18 y Figura 19).

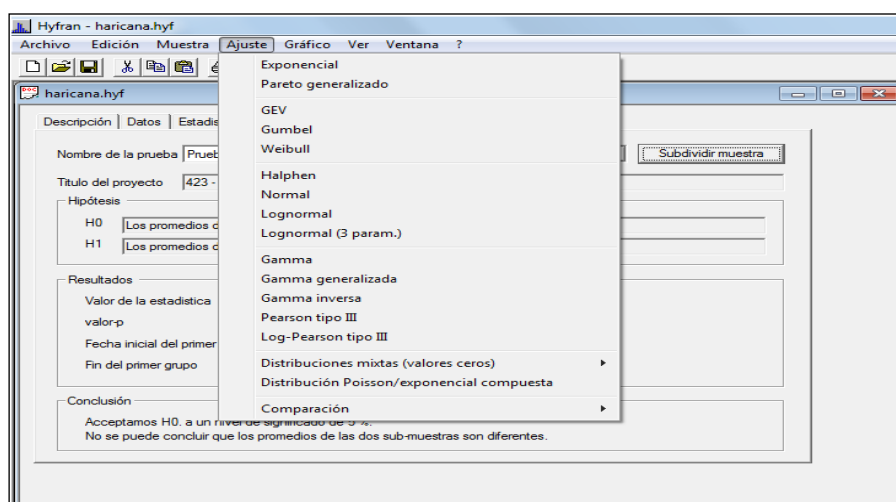


Figura 15: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad

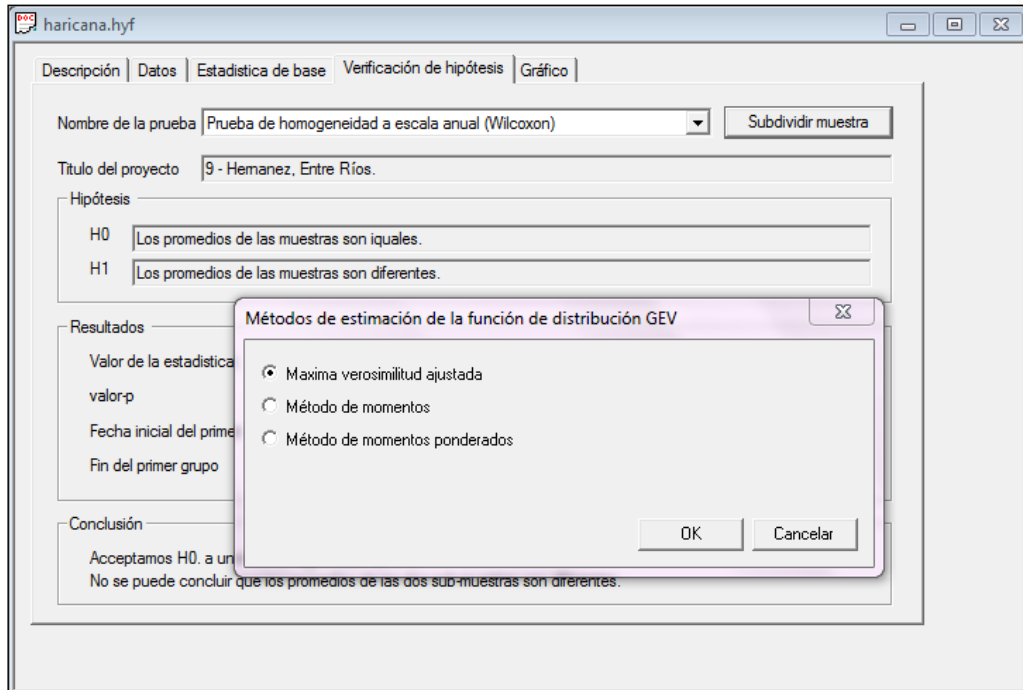


Figura 16: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad

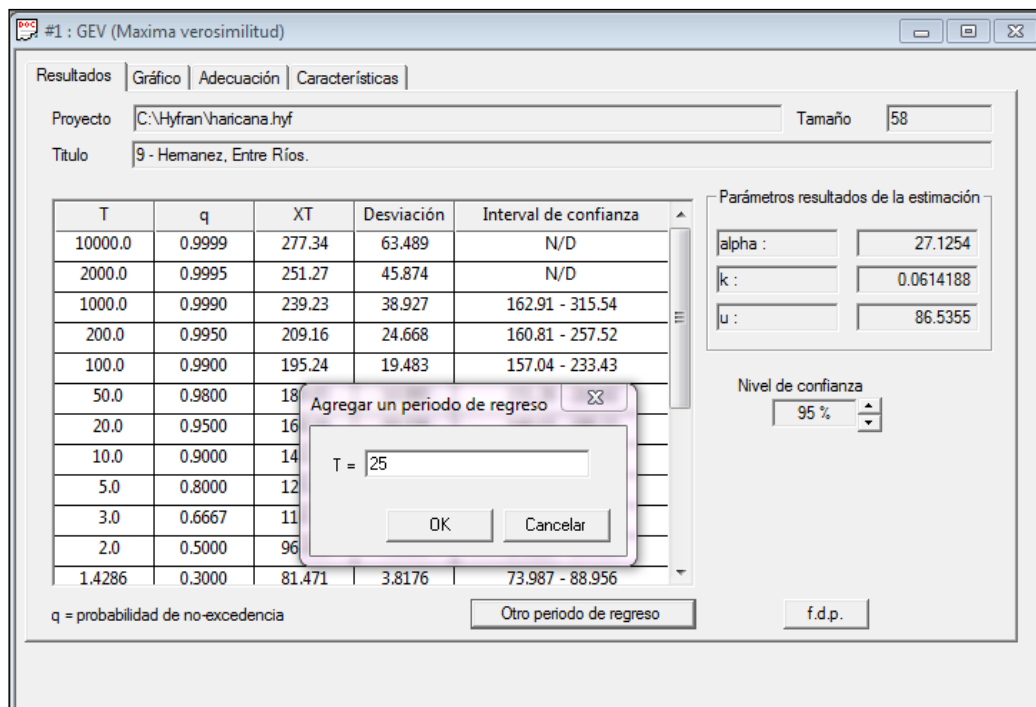


Figura 17: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años

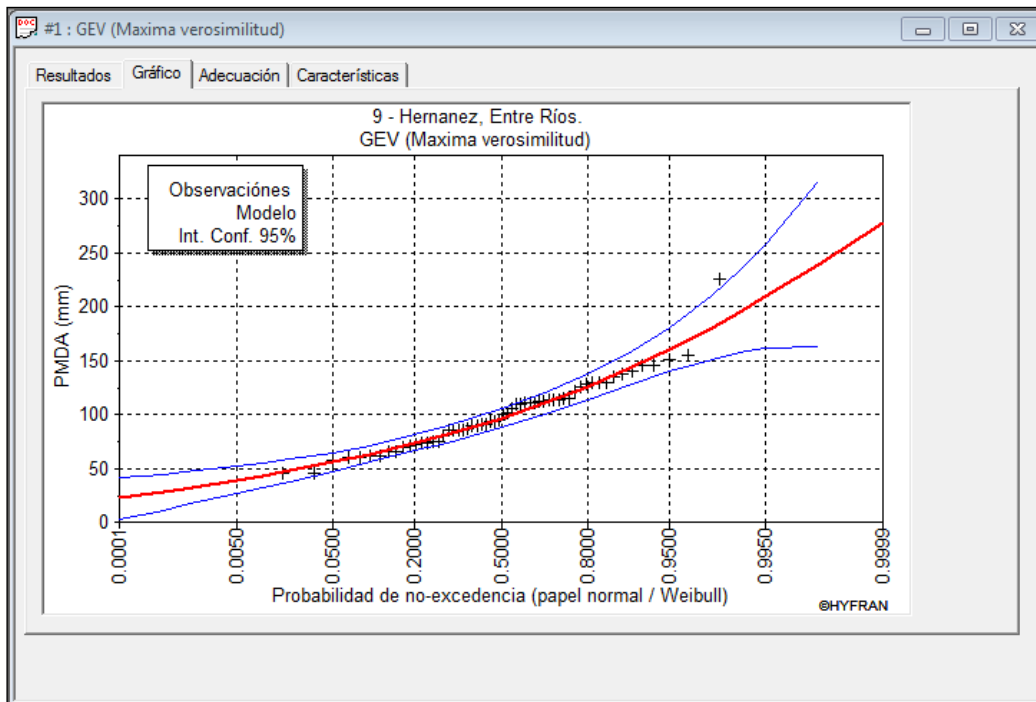


Figura 18: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

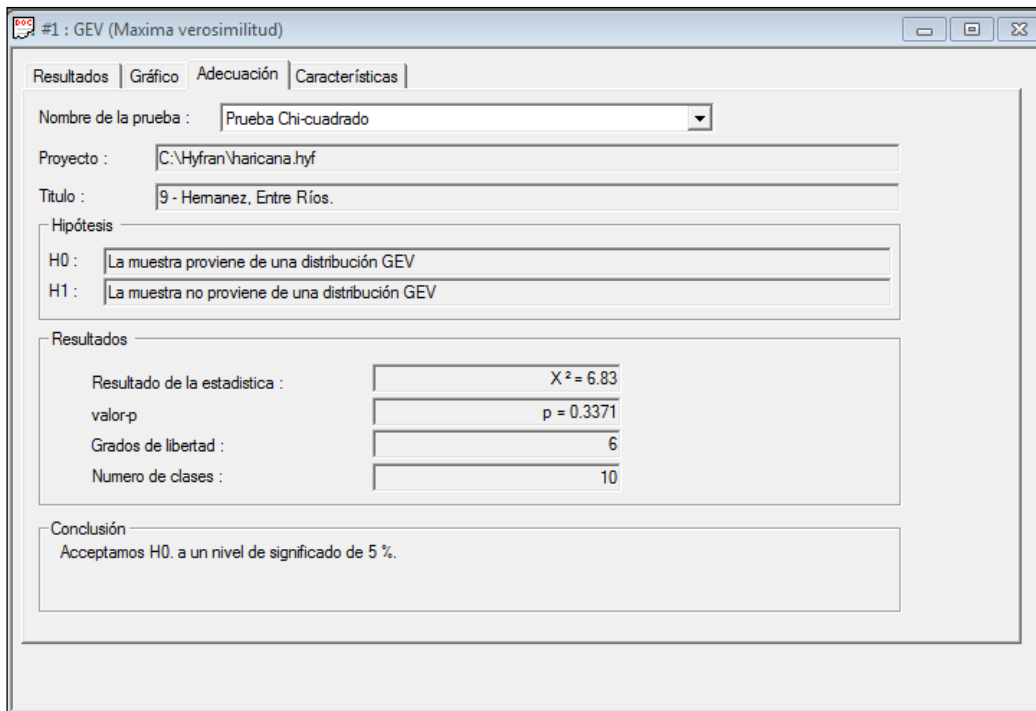


Figura 19: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Hernández en la Provincia de Entre Ríos (código interno 9)

De la Tabla 9 a la Tabla 14 se muestran los resultados del análisis inferencial realizado sobre los registros de la estación Hernández con las distintas distribuciones de probabilidades y métodos de estimación de parámetros.

9 - Hernandez, Entre Ríos.						
Resultados de ajuste						
GEV (Método de momentos)						
Numero de observaciones 58						
Parámetros						
alpha	26					
k	0.037904					
u	86					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación e Interval de confianza (95%)			
10000	0.9999	291.78	82.626	N/D	N/D	
2000	0.9995	260.82	57.47	N/D	N/D	
1000	0.999	246.9	47.857	N/D	N/D	
200	0.995	213.08	28.763	156.7	269.47	
100	0.99	197.84	22.084	154.54	241.13	
50	0.98	182.12	16.45	149.87	214.37	
25	0.96	165.87	11.948	142.44	189.29	
20	0.95	160.49	11	139.38	181.61	
10	0.9	143.25	8	127.76	158.75	
5	0.8	124.77	6	112.77	136.77	
3	0.6667	109.69	5	99.525	119.85	
2	0.5	95.846	4	87.187	104.51	
1	0.3	81.297	4	73.976	88.619	
1	0.2	73.526	4	66.432	80.62	
1	0.1	63.819	4	55.953	71.684	
1	0.05	56.602	5	47.242	65.961	
1	0.02	49.209	6	37.573	60.844	
1	0.01	44.653	7	31.292	58.014	
1	0.005	40.714	8	25.687	55.742	
1	0.001	33.206	9	14.595	51.817	
1	0.0005	30.48	10.219	10.447	50.514	
1	0.0001	25	11.781	1.882	48.071	

Tabla 9: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

9 - Hernandez, Entre Ríos.						
Resultados de ajuste						
Gumbel (Método de momentos)						
Numero de observaciones 58						
Parámetros						
u	86					
alpha	25					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación e Interval de confianza (95%)			
10000	0.9999	318.3	32.496	254.6	382.01	
2000	0.9995	277.7	26.945	224.87	330.52	
1000	0.999	260.2	24.559	212.06	308.35	
200	0.995	219.56	19.038	182.23	256.88	
100	0.99	202.01	16.67	169.33	234.69	
50	0.98	184.39	14.31	156.34	212.45	
25	0.96	166.65	11.959	143.21	190.09	
20	0.95	160.89	11.204	138.93	182.85	
10	0.9	142.73	9	125.34	160.12	
5	0.8	123.8	7	110.93	136.68	
3	0.6667	108.74	5	99.024	118.45	
2	0.5	95.211	4	87.567	102.85	
1	0.3	81.283	4	74.259	88.307	
1	0.2	73.961	4	66.484	81.437	
1	0.1	64.926	4	56.28	73.573	
1	0.05	58.288	5	48.479	68.097	
1	0.02	51.556	6	40.398	62.715	
1	0.01	47.441	6	35.397	59.486	
1	0.005	43.904	7	31.07	56.738	
1	0.001	37.213	7	22.83	51.596	
1	0.0005	34.801	8	19.846	49.756	
1	0.0001	29.956	8	14	46.079	

Tabla 10: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

9 - Hernandez, Entre Ríos.						
Resultados de ajuste						
Log-Pearson tipo III (Método de momentos (BOB), basis = 10)						
Numero de observaciones 58						
Parámetros						
alpha		-212				
lambda		836				
m		6				
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación e	Interval de confianza (95%)		
10000	0.9999	296.2	94.269	N/D	N/D	
2000	0.9995	261.19	63.196	N/D	N/D	
1000	0.999	246.15	51.661	N/D	N/D	
200	0.995	211.13	29.539	153.22	269.04	
100	0.99	195.9	22.178	152.42	239.37	
50	0.98	180.46	16.221	148.66	212.26	
25	0.96	164.68	12	141.76	187.6	
20	0.95	159.49	11	138.79	180.18	
10	0.9	142.83	8	127.49	158.17	
5	0.8	124.84	6	112.9	136.78	
3	0.6667	110.13	5	100.03	120.23	
2	0.5	96.064	4	87.339	104.79	
1	0.3	81.365	4	73.982	88.747	
1	0.2	73.517	4	66.374	80.66	
1	0.1	63.794	4	55.822	71.767	
1	0.05	56.682	5	47.173	66.191	
1	0.02	49.565	6	37.87	61.26	
1	0.01	45.293	7	32.061	58.525	
1	0.005	41.687	7	27.068	56.306	
1	0.001	35.083	9	17.819	52.347	
1	0.0005	32.787	9	14.604	50.97	
1	0.0001	28.34	10	8.44	48.241	

Tabla 11: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Log-Pearson tipo III (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

9 - Hernandez, Entre Ríos.						
Resultados de ajuste						
GEV (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 58						
Parámetros						
alpha	27					
k	0.061419					
u	87					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación estandar	Intervalo de confianza (95%)		
10000	0.9999	277.34	63.489	N/D	N/D	
2000	0.9995	251.27	45.874	N/D	N/D	
1000	0.999	239.23	38.927	162.91	315.54	
200	0.995	209.16	24.668	160.81	257.52	
100	0.99	195.24	19.483	157.04	233.43	
50	0.98	180.65	14.98	151.28	210.02	
25	0.96	165.31	11	143.27	187.34	
20	0.95	160.18	10	140.15	180.22	
10	0.9	143.55	8	128.61	158.48	
5	0.8	125.4	6	113.93	136.88	
3	0.6667	110.36	5	100.67	120.04	
2	0.5	96.366	4	87.92	104.81	
1	0.3	81.471	4	73.987	88.956	
1	0.2	73.436	4	66.135	80.738	
1	0.1	63.323	4	55.595	71.05	
1	0.05	55.748	4	47.072	64.424	
1	0.02	47.941	5	37.696	58.186	
1	0.01	43.105	6	31.608	54.602	
1	0.005	38.91	6	26	51.652	
1	0.001	30.874	8	15	46.377	
1	0.0005	28	8.4799	11.32	44.568	
1	0.0001	22	9.7266	2.9405	41.076	

Tabla 12: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

9 - Hernandez, Entre Ríos.						
Resultados de ajuste						
Gumbel (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 58						
Parámetros						
u	85					
alpha	27					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación e Interval de confianza (95%)			
10000	0.9999	334.55	27.23	281.17	387.93	
2000	0.9995	291.02	22.757	246.41	335.63	
1000	0.999	272.27	20.836	231.42	313.12	
200	0.995	228.69	16.396	196.55	260.83	
100	0.99	209.87	14.495	181.46	238.29	
50	0.98	190.99	12.604	166.28	215.7	
25	0.96	171.97	10.723	150.95	192.99	
20	0.95	165.79	10.121	145.95	185.63	
10	0.9	146.32	8	130.13	162.51	
5	0.8	126.03	6	113.44	138.62	
3	0.6667	109.88	5	99.863	119.89	
2	0.5	95.376	4	87.221	103.53	
1	0.3	80.444	4	73.377	87.51	
1	0.2	72.594	4	65.62	79.567	
1	0.1	62.908	4	55.556	70.259	
1	0.05	55.791	4	47.854	63.727	
1	0.02	48.573	4	39.836	57.31	
1	0.01	44.162	5	34.855	53.469	
1	0.005	40.37	5	30.534	50.206	
1	0.001	33.196	6	22	44.112	
1	0.0005	30.61	6	19	41.937	
1	0.0001	25	6	13	37.594	

Tabla 13: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

9 - Hernandez, Entre Ríos.						
Resultados de ajuste						
Lognormal (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 58						
Parámetros						
mu	5					
sigma	0.322189					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación e Interval de confianza (95%)			
10000	0.9999	316.91	38.009	242.4	391.42	
2000	0.9995	276.06	29.797	217.64	334.47	
1000	0.999	258.81	26.504	206.85	310.77	
200	0.995	219.29	19.408	181.24	257.34	
100	0.99	202.36	16.588	169.84	234.87	
50	0.98	185.34	13.909	158.07	212.61	
25	0.96	168.1	11.378	145.79	190.4	
20	0.95	162.46	10.597	141.69	183.23	
10	0.9	144.51	8.2832	128.27	160.74	
5	0.8	125.4	6	113.27	137.52	
3	0.6667	109.84	5	100.31	119.37	
2	0.5	95.618	4	87.688	103.55	
1	0.3	80.764	4	73.613	87.915	
1	0.2	72.912	4	65.859	79.965	
1	0.1	63.269	4	56.16	70.379	
1	0.05	56.277	4	49.081	63.474	
1	0.02	49.33	4	42.072	56.587	
1	0.01	45.182	4	37.921	52.443	
1	0.005	41.693	4	34.459	48.927	
1	0.001	35.326	4	28.234	42.418	
1	0.0005	33.119	4	26.111	40.127	
1	0.0001	28.85	3	22	35.633	

Tabla 14: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad LogNormal (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 58 años de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

Se destaca en los resultados reportados en las tablas precedentes la importancia de la amplitud de los intervalos de confianza para los valores de la variable analizada independientemente de la función de la distribución utilizada. Se puede observar en las planillas de cada ajuste que, a medida que aumenta el periodo de retorno, aumenta de forma considerable la diferencia entre el límite superior y el límite inferior lo que define el intervalo de confianza de la predicción de la lámina de lluvia diaria (Figura 20).

Este aumento del intervalo que se observa, del valor estimado, es debido a que la longitud de la serie histórica, en años, es mucho menor al periodo de retorno analizado. La bibliografía aconseja que la cantidad de años en los cuales se puede realizar una extrapolación confiable es igual a cuatro veces la cantidad de datos obtenidos; es decir, que para un registro de 20 años puede realizarse una extrapolación viable de hasta 80 años (probabilidad de no excedencia= 0,99); a partir de ese punto aumenta la incertidumbre de los valores obtenidos por los métodos de ajuste. Esto es recomendable al definir el periodo de retorno conveniente para el diseño de una obra, por lo que nuestro análisis sólo llega hasta los 100 años, con lo cual será válido para el cálculo de caudales de pequeñas y medianas obras.

Podemos observar en la Tabla 14 (Función de distribución de LogNormal) que el límite superior del intervalo de confianza de la variable para un periodo de retorno de 100 años es mayor que el valor medio obtenido para un periodo de retorno de 200 años. Por lo tanto, si se adoptara un T=200 años, no sería conveniente porque el diseño se haría para un valor esperado para un T=100 años. Debido a esto, es recomendable hacer hincapié en el hecho de que el escaso registro de datos pluviométricos con el que se cuenta en nuestro país limita la veracidad de los datos obtenidos por extrapolaciones para periodos de retorno altos.

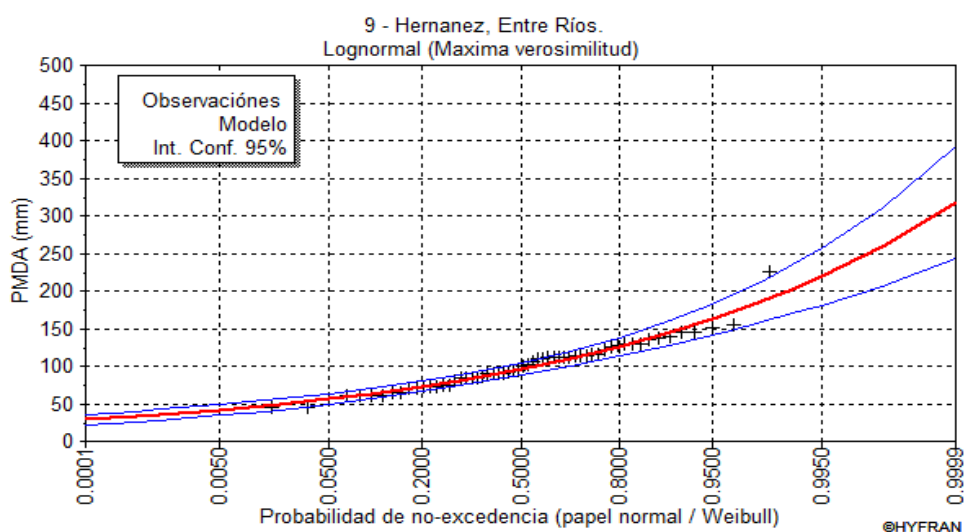


Figura 20: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación Hernández de la provincia de Entre Ríos (código interno 9)

4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.

Para finalizar el análisis se creó una planilla (Tabla 15) en donde se resumen los valores de láminas de lluvia para los distintos periodos de retorno con las distintas funciones de distribución y métodos de ajuste de los parámetros.

Tr	Precipitación Máxima Diaria Esperada para T(mm)					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	195.24	197.84	209.87	202.01	202.36	195.90
50	180.65	182.12	190.99	184.39	185.34	180.46
25	165.31	165.87	171.97	166.65	168.10	164.68
20	160.18	160.49	165.79	160.89	162.46	159.49
10	143.55	143.25	146.32	142.73	144.51	142.83
5	125.40	124.77	126.03	123.80	125.40	124.84

Tabla 15: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste

En la Tabla 16 se compara en forma relativa el porcentaje de variación de los distintos valores estimados para el mismo periodo de retorno de la función LogNormal con método de ajuste de Máxima Verosimilitud, ya que como se mencionó anteriormente, debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina, es que se adopta a priori la función de distribución LogNormal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Aun así se realizó un análisis de sensibilidad a esta decisión al comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos.

Tr	Porcentaje de variación % respecto a Log Normal					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	96.5%	97.8%	96.4%	99.8%	100.0%	96.8%
50	97.5%	98.3%	97.0%	99.5%	100.0%	97.4%
25	98.3%	98.7%	97.7%	99.1%	100.0%	98.0%
20	98.6%	98.8%	98.0%	99.0%	100.0%	98.2%
10	99.3%	99.1%	98.8%	98.8%	100.0%	98.8%
5	100.0%	99.5%	99.5%	98.7%	100.0%	99.6%

Tabla 16: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)

Se puede verificar en la tabla anterior, para períodos menores a los 50 años, las diferencias resultantes según las diferentes funciones de distribución respecto al LogNormal son menores al 3%. Mientras que para un período de retorno de 100 años, la diferencia resultante es levemente mayor (3.6%).

4.4.3. Contraste entre las distintas funciones de ajuste por Métodos de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud.

Para concluir con estas pruebas se compararon en un mismo gráfico (Figura 21 y Figura 22) las distintas funciones de distribución de probabilidad utilizadas. Se observó que hasta para un período de retorno de 200 años inclusive (Para una probabilidad de no-excedencia de 0,995) las diferencias entre las distintas funciones propuestas no son significativas.

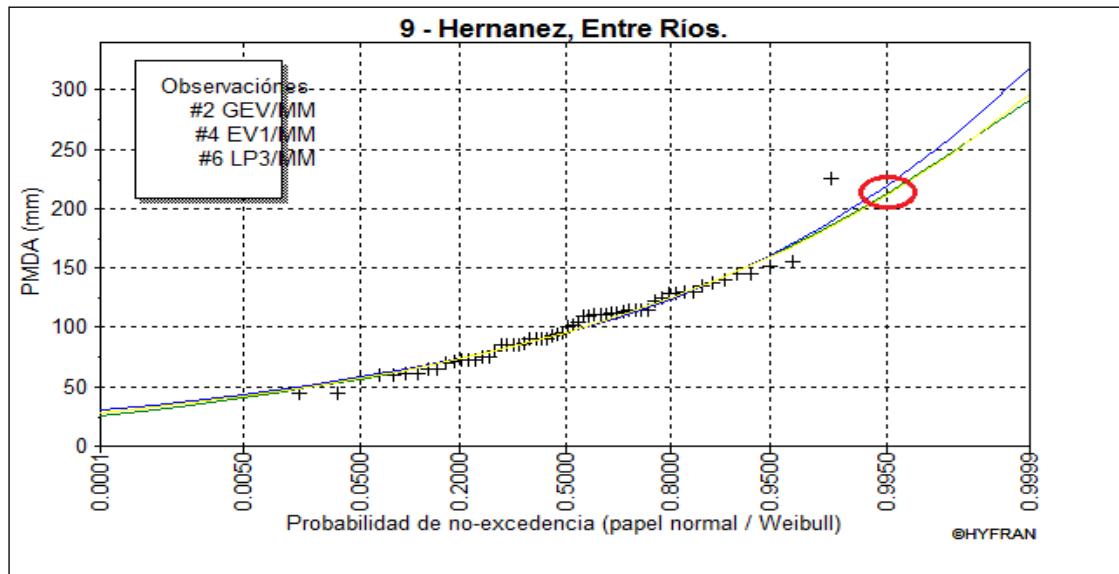


Figura 21: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos

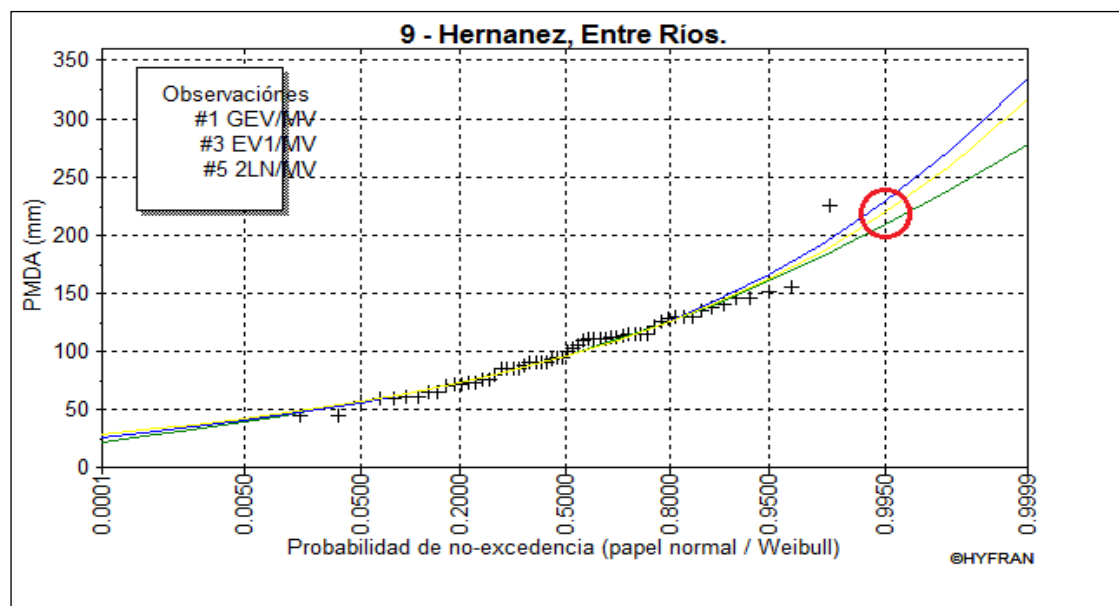


Figura 22: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de verosimilitud

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS.

En este apartado se busca sintetizar los resultados más relevantes de la información de todas las estaciones analizadas de Entre Ríos (capítulo IV).

5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS.

En esta sección se determinan cuáles fueron las estaciones que no pasaron (es decir, que fueron rechazadas a un nivel de significancia del 1%) las pruebas de hipótesis estadísticas.

5.1.1. Detección de presencia de Datos Atípicos.

En caso de que se detecten datos atípicos el procedimiento consiste en depurar el dato atípico y volver a realizar el análisis; en caso de no encontrar datos atípicos nuevamente la prueba verifica y se continúa. En caso contrario y al detectar un segundo dato atípico se descarta la estación.

En Entre Ríos ninguna de las estaciones procesadas presentó datos atípicos al realizarse el segundo análisis.

5.1.2. Prueba de Independencia.

De las sesenta y siete estaciones de Entre Ríos de las cuales se partió, una sola estación no pasó esta prueba, lo cual constituye el 1.5% de las estaciones con una longitud mayor a 14 años. En la Tabla 17 se muestra la estación que no verificó esta prueba.

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
20	Gilbert	49	-32.530	-58.932

Tabla 17: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Entre Ríos

5.1.3. Prueba de Estacionariedad.

Las estaciones que verificaron las anteriores pruebas y con longitud de serie mayor a 14 años fueron sometidas a la Prueba de Estacionariedad (Kendall). Habiendo 5 estaciones que no verificaron esta prueba, las cuales se muestran en la Tabla 18.

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
1	Banderas	46	-30.825	-59.234
2	Colonia Avigdor	44	-31.245	-59.745
4	San Gustavo	48	-30.367	-58.750
5	Pedro Vallejos	46	-30.857	-59.379
26	La Paz	44	-30.747	-59.607

Tabla 18: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Estacionariedad de sus valores máximos diarios de Entre Ríos

5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos.

Con respecto a las estaciones pertenecientes a la Provincia de Entre Ríos solo una no verificó esta prueba. En la Tabla 19 se muestra la estación que no verificó.

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
30	Purblo San Jaime	38	-30.333	-58.300

Tabla 19: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Homogeneidad de sus valores máximos diarios de Entre Ríos

Por lo tanto, se concluye que de las 67 estaciones pluviométricas con las que se inició el análisis en Entre Ríos, 60 pasaron las pruebas, representando éstas el 89.5% del total.

Finalmente se encontró que habían estaciones pluviométricas repetidas, es decir que se recopilaron distintas informaciones históricas de precipitación diaria de una misma localización geográfica (se obtuvieron de diferentes bases de datos). Debido a esta razón, se adoptó el siguiente criterio: para cada localización donde se contaba con más de una serie de datos de precipitación se eligió para el posterior análisis la que contaba con mayor longitud de serie. Esto ocurrió para los siguientes casos:

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
7	Feliciano	20	-30.6911	-59.3872
62	Feliciano	23	-30.6911	-59.3872

Tabla 20: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos

Como se puede apreciar en la Tabla 20 la Estación Pluviométrica de Feliciano cuenta con dos bases de datos de precipitación máxima diaria, según el criterio elegido se toma aquella cuya longitud de serie sea mayor, en éste caso la estación con el código 62 (23 años) supera la estación con el código 7 (20 años) eligiendo la del código 62 y descartando la restante.

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
35	Concordia	37	-31.391	-58.014
63	Concordia	43	-31.391	-58.014

Tabla 21: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos

En este caso, como se puede ver en la Tabla 21, nuevamente se vuelve a repetir la Base de Datos pero para la estación de Concordia, como dijimos anteriormente se selecciona aquella que cuenta con la mayor longitud de serie, la estación con el código interno 35 (37 años) es menor que la estación con código interno 63 (43 años), por lo tanto esta última se considera para el análisis descartando la del código 35.

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
21	Gualeguaychú	38	-33.017	-58.532
64	Gualeguaychú	44	-33.017	-58.532

Tabla 22: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos

La Estación Pluviométrica de Gualeguaychú es otra de las estaciones en las cuales se repite la Base de Datos (Tabla 22), en este caso como la estación con código interno 64 (44 años) es mayor que la estación con código 21 (38 años), se opto por la primera.

Cod. Interno	Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
23	Paraná	38	-31.738	-60.513
24	Paraná	50	-31.738	-60.513
25	Paraná	35	-31.738	-60.513
65	Paraná	44	-31.738	-60.513

Tabla 23: Estación Pluviométrica con Base de Datos repetida de la provincia de Entre Ríos

Finalmente la Estación Pluviométrica de Paraná es la estación en donde la Base de Datos más se repite (4 veces), según la Tabla 23, como se viene haciendo desde un principio, nos quedamos con aquella estación que tenga la mayor longitud de serie, siendo esta la estación con código interno 24 (50 años).

En las tablas a continuación a modo de resumen se presenta en forma descendente la depuración de las estaciones debido a las pruebas anteriores para la provincia de Entre Ríos (Tabla 24), se puede ver en esta tabla que una estación se eliminó por falta de datos de coordenadas (Esc. N° 9Chañar-Policía).

ENTRE RÍOS		
Pruebas	Cantidad de estaciones	Porcentaje
Estaciones iniciales recopiladas	67	100%
Longitud de serie \geq 14 años	67	100%
Datos atípicos	67	100%
Independencia	66	98%
Estacionariedad	61	91%
Homogeneidad a escala anual	60	89%
Base de Datos repetidas	54	81%
Sin Coordenadas	53	79%
Estaciones finales seleccionadas	53	79%

Tabla 24: Depuración de las estaciones de Entre Ríos según las pruebas a verificar

Esto quiere decir que del 100% de las Bases de Datos que teníamos al comienzo solo el 21% no paso por las pruebas de depuración, quedando el 79% de las estaciones para el siguiente paso en el análisis.

5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log Normal.

A continuación se analiza la evolución con la longitud de la serie de la máxima diferencia porcentual entre la función Lognormal y la función de distribución que más se aleja de esta para T=100 años. Se puede observar en la Figura 22 que a medida que crecen las longitudes de serie, la máxima diferencia de algunos valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Lognormal disminuye.

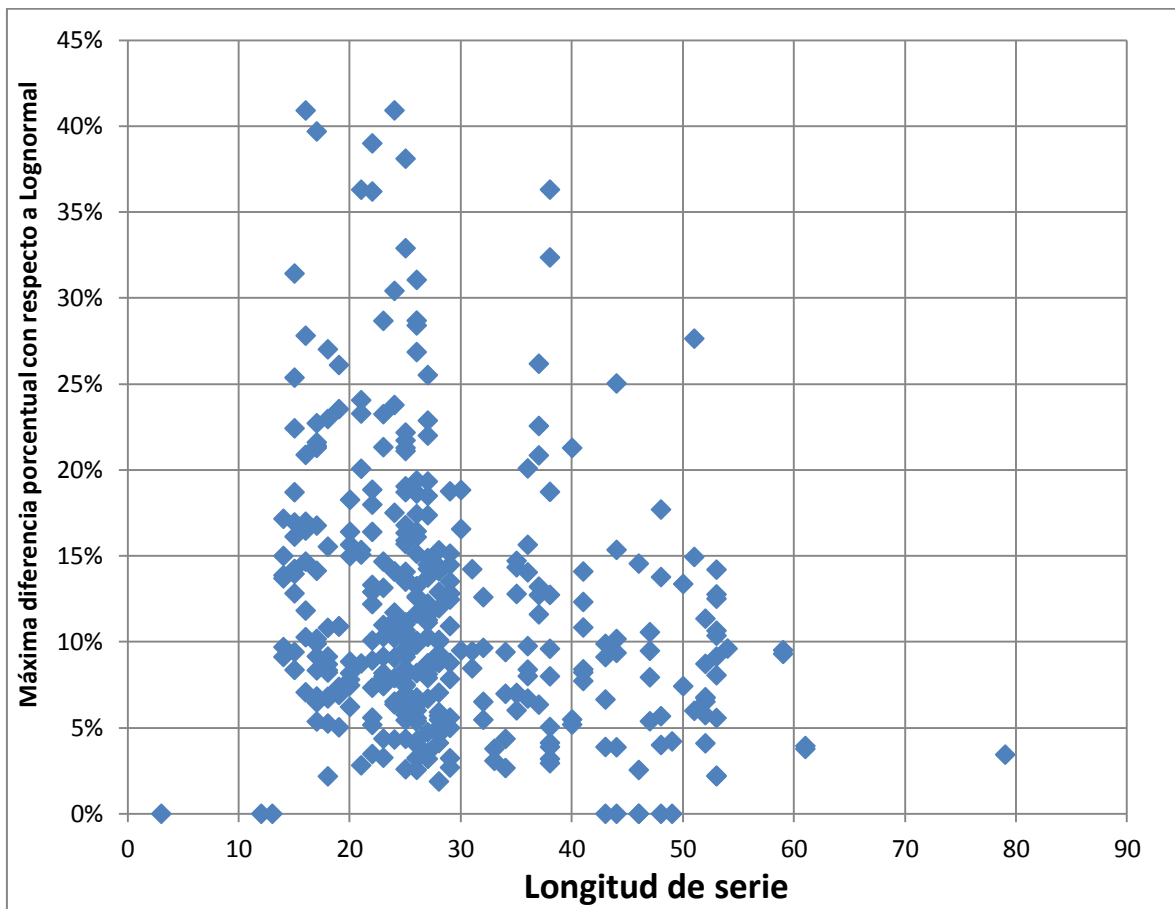


Figura 23: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad.

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se grafica la máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la incertidumbre porcentual del método Lognormal; ambas variables para $T=100$ años (caso más desfavorable). En este análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la Figura 23 con los intervalos de confianza. En la Figura 24 se puede ver el análisis realizado.

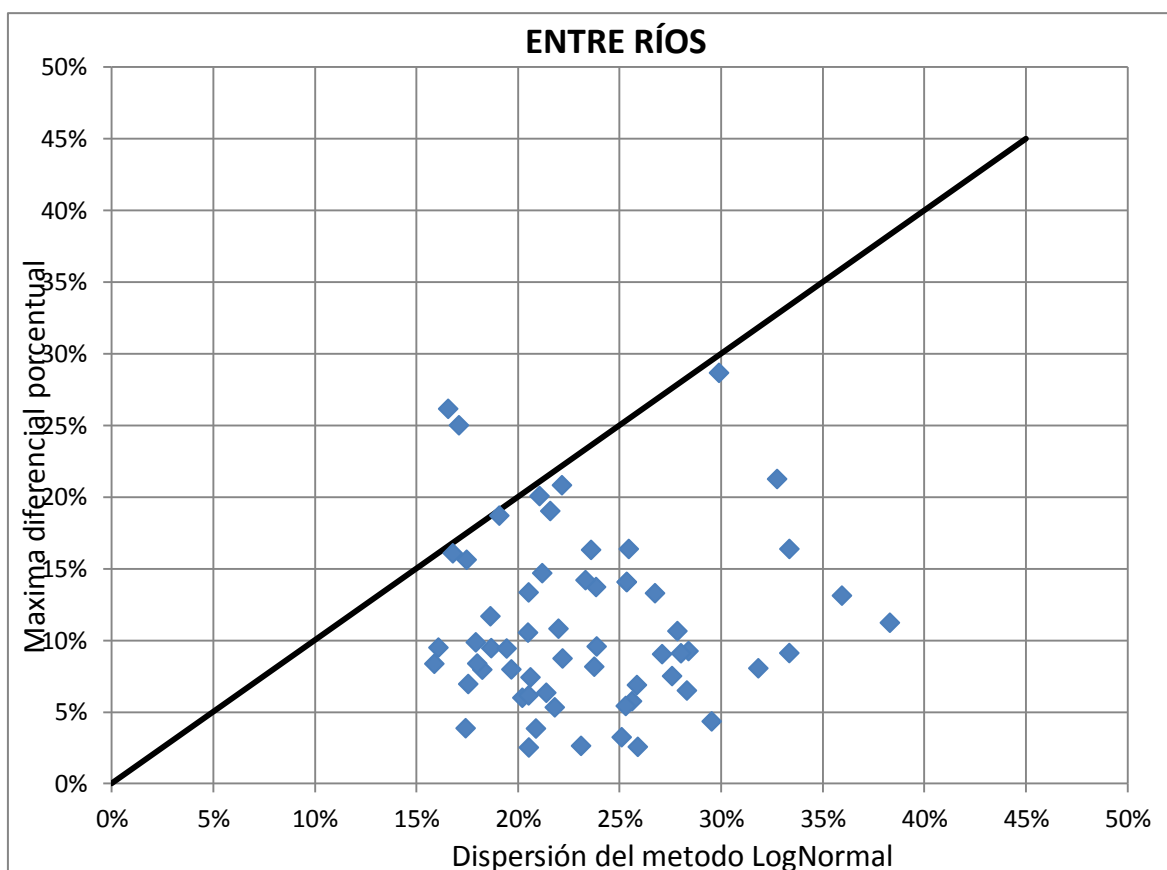


Figura 24: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años

Visualizando esta última figura se observa que casi en la totalidad de los casos la incertidumbre relativa a estimar los valores de lámina con la función de distribución Lognormal es mayor que la máxima diferencia porcentual entre Lognormal y la función de distribución que más se aleja de esta; por lo que es correcto seleccionar a la función Lognormal como la que define la relación entre la lámina de lluvia precipitada y el tiempo de retorno.

Del análisis de las imágenes anteriores, para un período de retorno para 100 años (T=100), se muestra que el intervalo de confianza de LogNormal, comprende entre sus límites, a todas las funciones de distribución. Por lo que no se incurre en un error significativo al adoptar esta distribución (LogNormal). Esto se demuestra al quedar casi todos los valores por debajo de la recta de 45 grados en las figuras (solo dos se encuentran por encima).

5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

A continuación se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes – Valor máximo de lámina de lluvia anual, Media y Desvío – de las estaciones finalmente seleccionadas (Tabla 25).

ID Org.	Código	Nombre de la estación	Provincia	Serie	Máximo	Media(Ln)	Desvío(Ln)
1	3	El Carmen Yeso Oeste	Entre Ríos	47	225	4.7267	0.3689
2	6	La Lila	Entre Ríos	26	203	4.6071	0.2901
3	8	Febre	Entre Ríos	36	215	4.5685	0.3310
4	9	Hernández	Entre Ríos	59	285	4.5789	0.3496
5	10	Crucesitas III	Entre Ríos	47	155	4.4645	0.3363
6	11	González Calderón	Entre Ríos	41	240	4.6240	0.3694
7	12	Los Conquistadores (SG)	Entre Ríos	25	240	4.6505	0.3340
8	13	Galeguay	Entre Ríos	23	157	4.6583	0.2339
9	14	La Lita	Entre Ríos	22	193	4.6029	0.3066
10	15	Los Pinos	Entre Ríos	24	250	4.7118	0.3612
11	16	Valdegovia	Entre Ríos	23	271	4.7064	0.3689
12	17	Villaguay AERO	Entre Ríos	27	174	4.5654	0.3011
13	18	Rosario del Tala	Entre Ríos	26	144	4.6241	0.2234
14	19	La Matilde	Entre Ríos	23	250	4.6460	0.4490
15	24	Paraná DPH	Entre Ríos	50	185	4.5607	0.3813
16	27	Isletas CR	Entre Ríos	46	200	4.4777	0.3656
17	28	Hinojal CR	Entre Ríos	25	198	4.5812	0.3608
18	29	Chapetón	Entre Ríos	27	186	4.6084	0.3235
19	31	Sta. Maria de Tatuti	Entre Ríos	26	199	4.6434	0.3160
20	32	Chajari	Entre Ríos	25	199	4.5681	0.3702
21	33	Colón	Entre Ríos	36	182	4.5996	0.2743
22	34	Concepción del Uruguay INTA	Entre Ríos	38	175	4.5358	0.2815
23	36	El Redomón	Entre Ríos	24	239	4.5861	0.4893
24	37	El Yuqueri	Entre Ríos	31	225	4.6950	0.2831
25	38	La Estrella	Entre Ríos	26	277	4.7177	0.3977
26	39	Los Charruas	Entre Ríos	31	253	4.6354	0.3396
27	40	San Salvador	Entre Ríos	41	224	4.5885	0.3020
28	41	Villa Elisa CR	Entre Ríos	22	180	4.6612	0.3264
29	42	Castelar INTA	Buenos Aires	36	124	4.3787	0.2496
30	43	Pergamino INTA	Buenos Aires	37	199	4.3620	0.3533
31	44	San Pedro INTA	Buenos Aires	38	188	4.5018	0.3179
32	45	Arerungua	R.O.Uruguay	24	185	4.7055	0.3237
33	46	Artigas	R.O.Uruguay	25	242	4.7842	0.3654
34	47	Belén	R.O.Uruguay	24	175	4.6714	0.2380
35	48	Bella Unión	R.O.Uruguay	24	160	4.6555	0.2731
36	49	Bnbe. Rivera	R.O.Uruguay	25	197	4.7191	0.2676
37	50	Colonia	R.O.Uruguay	35	220	4.5381	0.3284
38	51	Jav. De Viana	R.O.Uruguay	25	231	4.7861	0.3370
39	52	Mercedes	R.O.Uruguay	34	187	4.5430	0.3527
40	53	T. Gomensoro	R.O.Uruguay	25	258	4.7701	0.4271
41	54	Po. Del León	R.O.Uruguay	25	186	4.7026	0.2814
42	55	Paso Farias	R.O.Uruguay	25	255	4.6496	0.4150
43	56	Term. Arapey	R.O.Uruguay	25	162	4.5827	0.2688
44	57	Valentín	R.O.Uruguay	25	205	4.5742	0.3377
45	58	Arerungua	R.O.Uruguay	24	185	4.7055	0.3237
46	59	Po. Potrero	R.O.Uruguay	25	183	4.7193	0.3076
47	60	Paysandú	R.O.Uruguay	35	171	4.5960	0.2718
48	61	Salto	R.O.Uruguay	25	270	4.6798	0.3630
49	62	Feliciano	Entre Ríos	23	217	4.8035	0.2994
50	63	Concordia	Entre Ríos	43	192	4.5788	0.3083
51	64	Galeguaychu	Entre Ríos	44	180	4.5478	0.2976
52	66	A° Las Conchas	Entre Ríos	25	180	4.5619	0.3299
53	67	Del Doll	Entre Ríos	23	196	4.6721	0.3135

Tabla 25: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Entre Ríos

5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

Se conformó una tabla resumen con los valores de distribución de probabilidad empírica para los periodos de retorno T= 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años de las estaciones finalmente seleccionadas (Tabla 26). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Código	Nombre de la estación	Provincia	Serie	PMD ₂	PMD ₅	PMD ₁₀	PMD ₂₀	PMD ₂₅	PMD ₅₀	PMD ₁₀₀
3	El Carmen Yeso Oeste	Entre Ríos	47	113	154	155	173	179	196	212
6	La Lila	Entre Ríos	26	100	128	145	162	167	182	197
8	Febre	Entre Ríos	36	96	127	147	166	172	190	208
9	Hernández	Entre Ríos	59	97	131	152	173	180	200	220
10	Crucesitas III	Entre Ríos	47	87	115	134	151	157	173	190
11	González Calderón	Entre Ríos	41	102	139	164	187	195	218	241
12	Los Conquistadores (SG)	Entre Ríos	25	105	139	161	181	188	208	228
13	Gualeguay	Entre Ríos	23	108	131	144	157	161	172	183
14	La Lita	Entre Ríos	22	101	132	151	169	175	192	209
15	Los Pinos	Entre Ríos	24	111	151	177	202	209	234	258
16	Valdegovia	Entre Ríos	23	111	151	178	203	211	236	261
17	Villaguay AERO	Entre Ríos	27	96	124	141	158	163	178	194
18	Rosario del Tala	Entre Ríos	26	102	123	136	147	151	161	171
19	La Matilde	Entre Ríos	23	104	152	185	218	229	262	296
24	Paraná DPH	Entre Ríos	50	96	132	156	179	186	209	232
27	Isletas CR	Entre Ríos	46	88	120	141	161	167	187	206
28	Hinojal CR	Entre Ríos	25	98	132	155	177	184	205	226
29	Chapetón	Entre Ríos	27	100	132	152	171	177	195	213
31	Sta. Maria de Tatuti	Entre Ríos	26	104	135	156	175	181	199	217
32	Chajari	Entre Ríos	25	96	132	155	177	184	206	228
33	Colón	Entre Ríos	36	99	125	141	156	161	174	188
34	Concepción del Uruguay INTA	Entre Ríos	38	93	118	134	148	156	166	180
36	El Redomón	Entre Ríos	24	98	148	184	219	231	268	306
37	El Yuqueri	Entre Ríos	31	109	139	157	174	180	196	211
38	La Estrella	Entre Ríos	26	112	156	186	215	225	253	282
39	Los Charruas	Entre Ríos	31	103	137	159	180	187	207	227
40	San Salvador	Entre Ríos	41	98	127	145	162	167	183	199
41	Villa Elisa CR	Entre Ríos	22	106	139	161	181	187	207	226
42	Castelar INTA	Buenos Aires	36	80	98	110	120	123	133	142
43	Pergamino INTA	Buenos Aires	37	78	106	123	140	146	162	178
44	San Pedro INTA	Buenos Aires	38	90	118	135	152	157	173	189
45	Arerungua	R.O.Uruguay	24	110	145	167	188	195	215	235
46	Artigas	R.O.Uruguay	25	120	163	191	218	227	253	280
47	Belén	R.O.Uruguay	24	107	130	145	158	162	174	186
48	Bella Unión	R.O.Uruguay	24	105	132	149	165	170	184	198
49	Bnbe. Rivera	R.O.Uruguay	25	112	140	157	174	179	194	209
50	Colonia	R.O.Uruguay	35	93	123	142	160	166	184	201
51	Jav. De Viana	R.O.Uruguay	25	120	159	185	209	216	239	262
52	Mercedes	R.O.Uruguay	34	94	126	148	168	174	194	213
53	T. Gomensoro	R.O.Uruguay	25	118	169	204	238	249	284	319
54	Po. Del León	R.O.Uruguay	25	110	140	158	175	180	197	212
55	Paso Farías	R.O.Uruguay	25	105	148	178	207	216	245	275
56	Term. Arapey	R.O.Uruguay	25	98	123	138	152	157	170	183
57	Valentín	R.O.Uruguay	25	97	129	149	169	175	194	213
58	Arerungua	R.O.Uruguay	24	111	145	167	188	195	215	235
59	Po. Potrero	R.O.Uruguay	25	112	145	166	186	192	211	229
60	Paysandú	R.O.Uruguay	35	99	125	140	155	159	173	187
61	Salto	R.O.Uruguay	25	108	146	172	196	203	227	251
62	Feliciano	Entre Ríos	23	122	157	179	200	206	226	245
63	Concordia	Entre Ríos	43	97	126	145	162	167	183	200
64	Gualeguaychu	Entre Ríos	44	94	121	138	154	159	174	189
66	A° Las Conchas	Entre Ríos	25	96	126	146	165	171	189	206
67	Del Doll	Entre Ríos	23	107	139	160	179	185	204	222

Tabla 26: Valores de lluvias máximas diarias (PMD) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Entre Ríos

Finalmente para contrastar se muestra la Figura 25 la cual contiene sólo las estaciones que verificaron las pruebas de hipótesis de estadísticas básicas y que fueron analizadas con estadística inferencial.

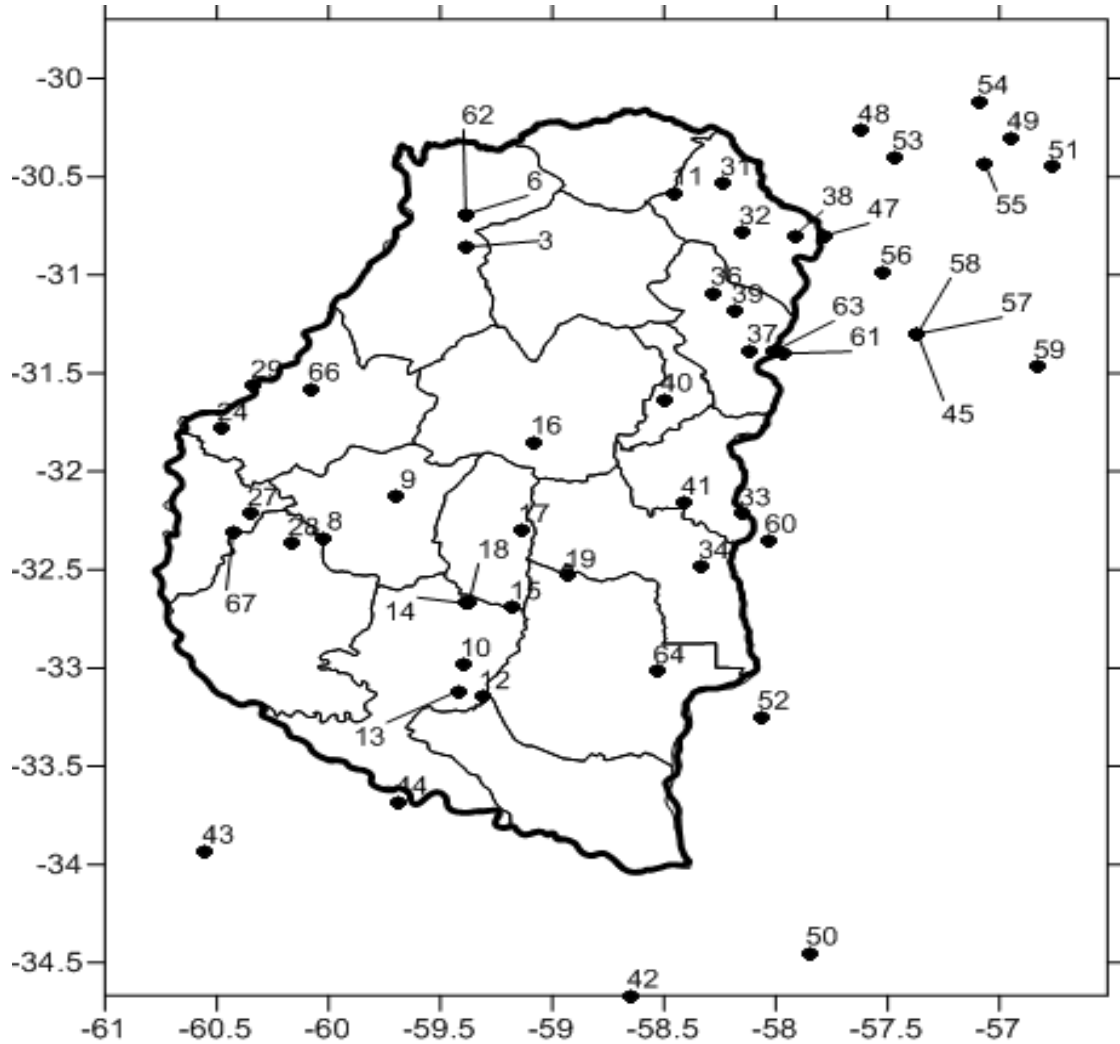


Figura 25: Estaciones finalmente seleccionadas de Entre Ríos

6. CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DÍARIA.

6.1. INTRODUCCIÓN.

Antes de comenzar la explicación al detalle de la confección de los mapas de lluvia máxima diaria asociados a diferentes T en la provincia de Entre Ríos, vale la pena recordar que este trabajo se encuentra incluido dentro de un proyecto nacional que incluye a todas las provincias de la Argentina y que busca la generación de una herramienta para poder predecir las lluvias máximas diarias asociadas a un tiempo de retorno dado (ver sección 1.1.1. de este trabajo). Es por ello que los mapas aquí presentados no son solamente los de la provincia de Entre Ríos (tal como los realizados por Zamanillo en el año 2009) sino que se muestra la metodología completa de construcción de los mapas de toda la región analizada hasta la actualidad.

En resumen, se procedió a ubicar espacialmente las distintas estaciones pluviométricas y regionalizar los valores de lámina de lluvia para los distintos periodos de retorno, para luego, mediante el empleo de técnicas de análisis espacial poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el Idrisi Selva, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georeferenciado.

6.2. CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.

Para la conformación de la base de datos empleada se recurre al paquete computacional IDRISI Selva, con el cual es posible transformar datos numéricos en un archivo digital. La gran virtud de este sistema es la facilidad con la que se puede relacionar información y referenciarla mediante coordenadas al espacio. A continuación se detallan los pasos seguidos para la elaboración de la base de datos con el programa de referencia.

1. Se realiza una hoja de cálculo, en la cual se visualiza el nombre de las estaciones junto a su código, coordenadas geográficas, parámetros estadísticos, lluvia máxima diaria anual para los distintos periodos de retorno, juntos con sus intervalos de confianza, además de otra información relevante como longitud de serie, departamento, etc.

2. Con la información ya organizada, se prosigue a incorporarla al programa IDRISI Selva. Para ello, es necesario crear una nueva Bases de Datos, en el menú GIS Analysis se elige la opción DatabaseQuery y luego DatabaseWorkshop (Figura 26) o bien a través del menú Data Entry. En forma directa se podrá hacer clic sobre el icono en la barra de herramientas.
3. Una vez abierto el cuadro de diálogo, se debe crear un nuevo archivo, para lo cual, en el menú File se selecciona la opción New y se le asigna un nombre.
4. A continuación, se debe importar la planilla de Excel previamente tabulada. En el cuadro de diálogo de DatabaseWorkshop, en el menú File seleccionar la opción Import, Table y posteriormente from External File como se muestra en la Figura 27. Finalmente, se debe guardar con la opción Save del menú File.

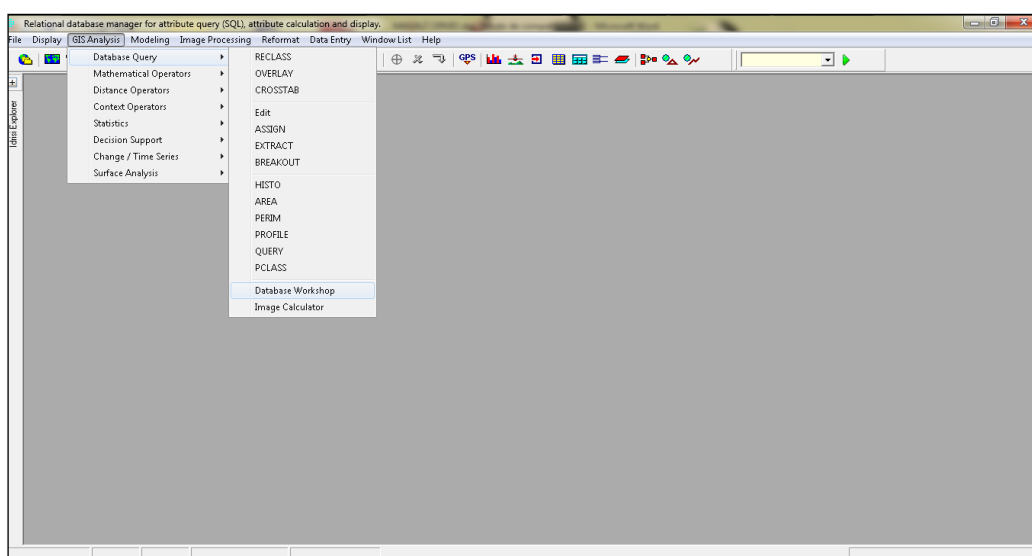


Figura 26: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop

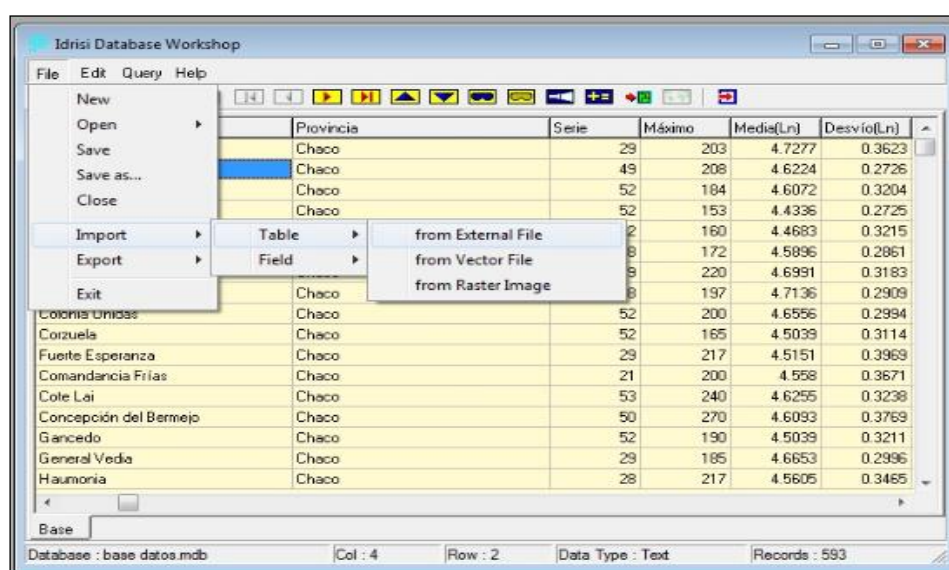



Figura 27: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import

6.3. CREACIÓN DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES.

Disponiendo de la base de datos, es necesario crear un archivo de tipo vector punto para posteriormente generar una Imagen Digital. Los archivos de puntos se utilizan para representar características, donde sólo tiene importancia la ubicación. Cada característica de punto se describe con un valor de atributo, que puede ser entero o real, y con un par de coordenadas (X, Y). En nuestro caso, cada punto representa una de las estaciones pluviométrica y los atributos asignados son los distintos valores Mínimos, Medios y Máximos esperados de lluvia máxima diaria anual para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Un archivo de valores es un archivo muy simple que contiene los valores para un solo atributo. Se almacena en un formato de texto ASCII y consiste en dos columnas de datos separadas por uno o más espacios. La primer columna contiene un identificador que puede usarse para asociar el valor con una característica tanto raster como vectorial, mientras que la segunda contiene el valor del atributo. Los archivos con valores de atributo tienen una extensión .avl. Dichos archivos pueden ser importados o exportados desde o hacia una tabla de base de datos usando el Taller de Bases de Datos.

1. En primer lugar, se debe abrir la base de datos. Para ello, desde el menú File se elige la opción Open y se selecciona Database File.
2. Una vez visualizada la base datos correspondiente, nuevamente en el menú File, se escoge la opción Export y se selecciona Field, X Y to Point Vector File como se muestra en la Figura 28. Se genera de esta manera la Figura 29.
3. Luego se debe abrir el cuadro de diálogo Export Vector File como se muestra en la Figura 30. En el presente trabajo se adopta el sistema de coordenadas (X, Y) de latitud y longitud con el cual se ubican las estaciones pluviométricas. Por esta razón se utiliza el sistema de referencia LATLONG equivalente al WSG1984 y grados como unidades de referencia.
4. Luego se debe establecer un vector de enlace. Para ello se debe hacer clic en el ícono  para abrir el cuadro de diálogo de Establish a Display Link, como se muestra en la Figura 31.

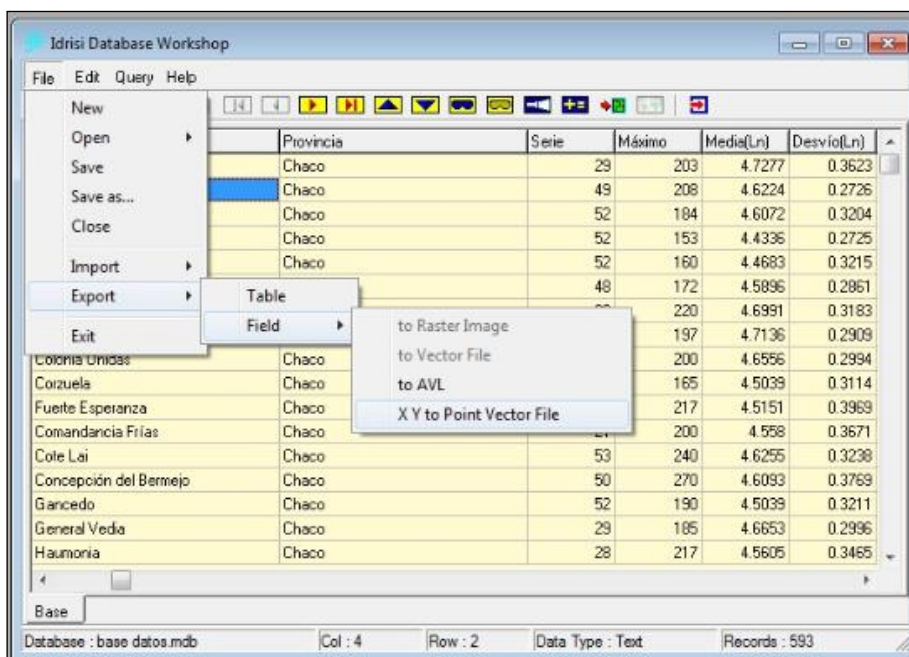


Figura 28: Cuadro de Diálogo Database Workshop - Export

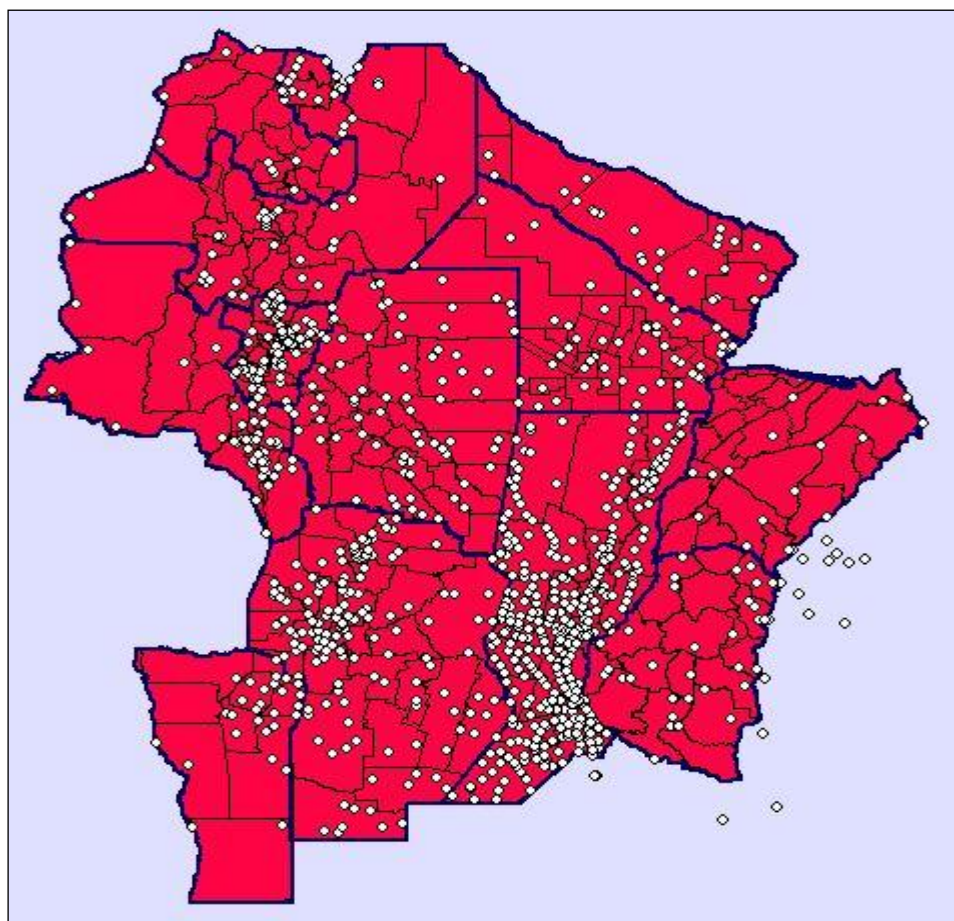


Figura 29: Mapa con la localización de las estaciones en las provincias analizadas hasta la actualidad

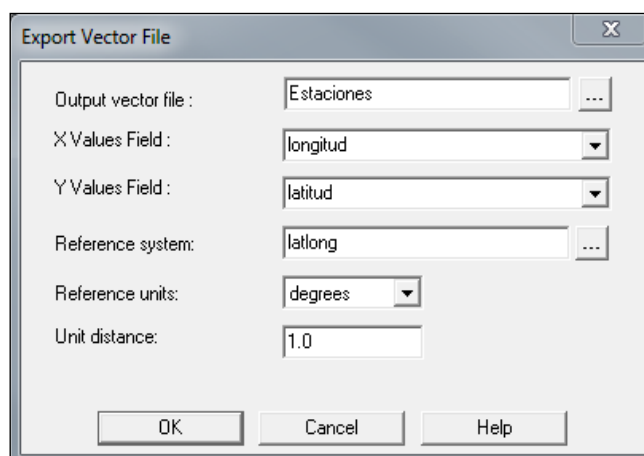


Figura 30: Cuadro de Diálogo Export Vector File

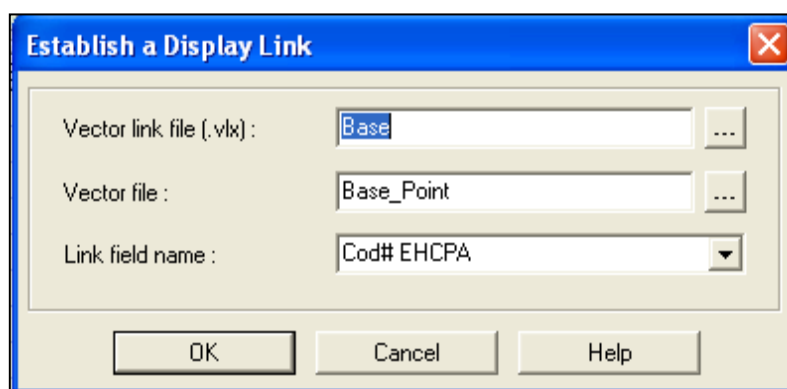


Figura 31: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link

Vector link file: asocia un archivo vectorial de definición de características con una tabla de base de datos.

Vector file: la hoja que se usa como base (archivo vectorial de valores).

Link fieldname: el archivo al cual se hace referencia.

Desde el cuadro DatabaseWorkshop se ejecuta la opción CreateIrisi Vector File. Aparecerá en pantalla una nueva ventana Export Vector File que se debe completar de la siguiente manera, según la Figura 32:

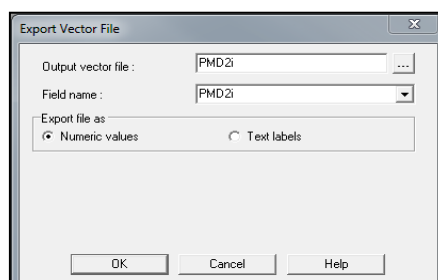


Figura 32: Cuadro de Diálogo Export Vector File

Dicho mecanismo para la generación de vectores se realiza para los valores mínimos, medios y máximos esperados de precipitación para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años. Los mapas logrados hasta el momento son como el de la Figura 33.

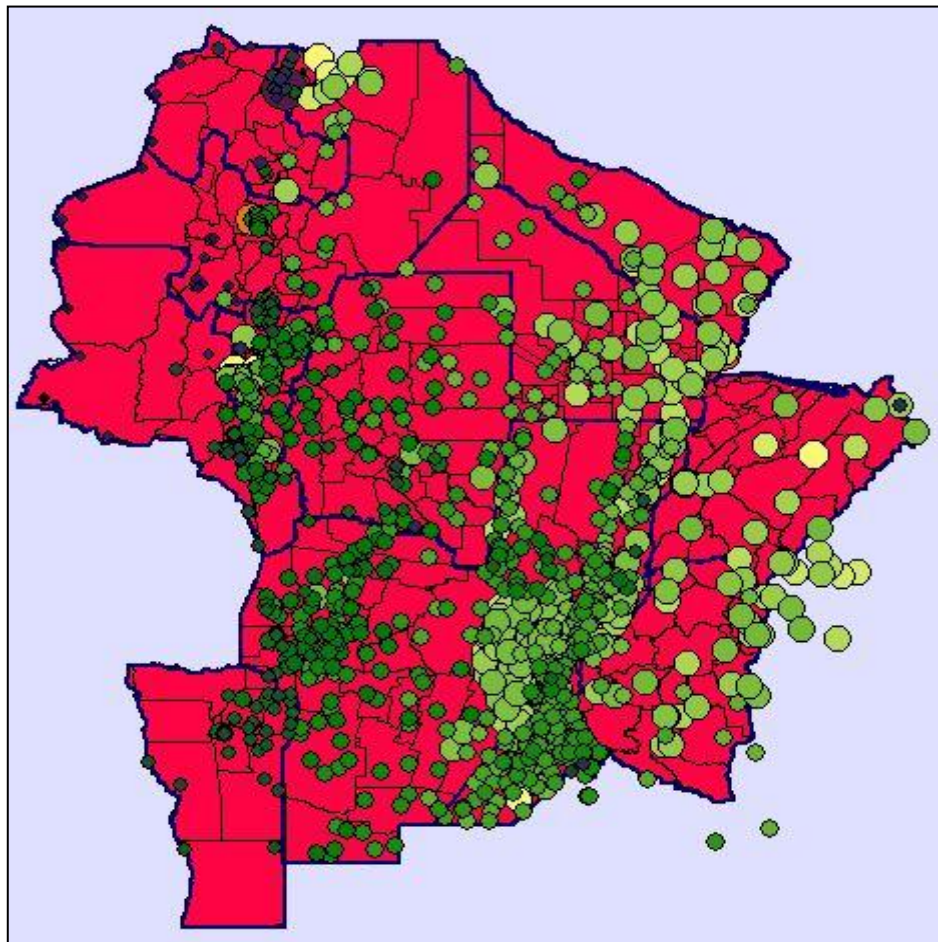


Figura 33: Mapa con la localización y valores de lluvias máximas diarias para T= 2 años, en las provincias analizadas hasta la actualidad

6.4. GENERACIÓN DE UNA MÁSCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACIÓN.

Para poder generar las superficies con el método de interpolación de Kriging, el programa necesita la creación de una “máscara”, para delimitar las zonas de interpolación de la variable en cuestión. Para ello se describen a continuación los pasos a seguir:

- a) En Autocad se generó la superficie que luego se utilizó como máscara, esta debe ser creada con una polilínea cerrada. Una vez terminada se guardó el archivo en formato “dxf” – “Autocad R12”.
- b) Se importó el archivo dxf a IDRISI, a través de la función “file”, “Import”, “Desktop publishingformats”, “DXFIDRISI” (Figura 34 y Figura 35)

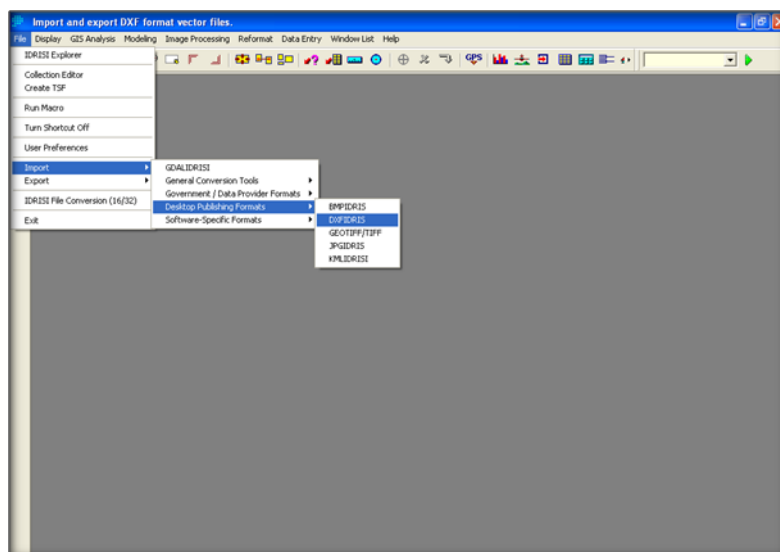


Figura 34: Cuadro de dialogo Import Dxf IDRISI



Figura 35: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

c) Se debe describir la configuración de la superficie, como ser Reference system, Reference units, Featurestoextract. En la Figura 36, se puede apreciar en detalle la metodología.

d) Luego debo transformar esta superficie que se encuentra como vector en un archivo raster, para poder ser utilizado en el modelo de Kriging, a través de la opción "Reformat" y "RASTERVECTOR" (Figura 37 y Figura 38).

e) Por último, en la Figura 39, se muestra el formato de salida de la máscara utilizada para la provincia de Entre Ríos donde se excluye del análisis la región donde no se recopilaron datos pluviométricos.

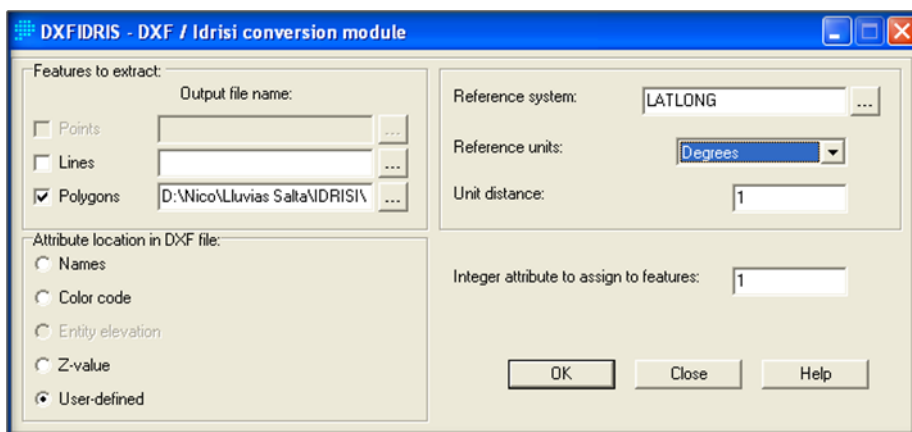


Figura 36: Cuadro de diálogo DXF / Idrisi conversión module

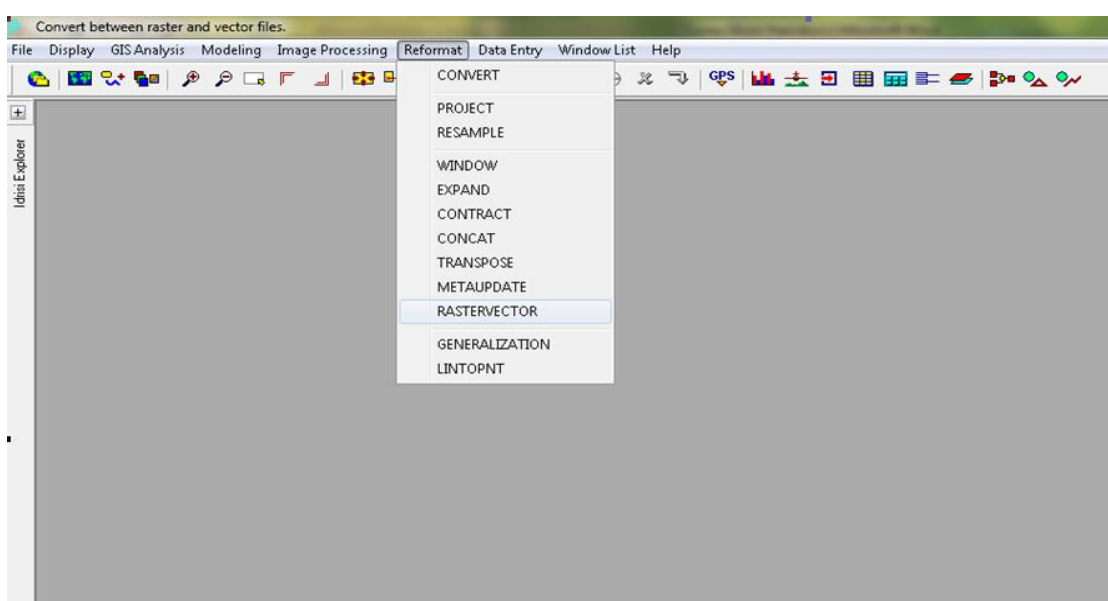


Figura 37: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR

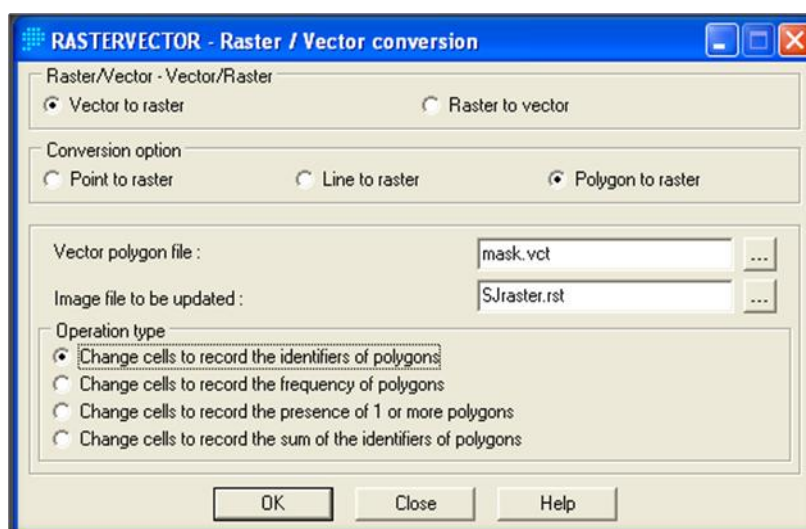


Figura 38: Cuadro de dialogo Raster / Vector Conversión



Figura 39: Máscara utilizada para las Provincias analizadas hasta la actualidad

6.5. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING.

El submenú Kriging conduce a tres interfases. En la interface SpatialDependenceModeler (Modelador de Dependencia Espacial), se emplea un amplio rango de herramientas para aprender acerca de los patrones de dependencia espacial en el juego de datos de muestra. En la interfase ModelingFitting (Ajuste de la Modelación), se definen modelos matemáticos para describir las relaciones de covarianza entre los datos de muestra. Por último, en la interfase Kriging and Simulation (Kriging y Simulación) se pueden crear superficies raster completas a partir de datos de muestras y a través de otras interfaces desarrollar modelos. El uso de estas técnicas geo estadísticas es más amplio que el de interpolación, y por lo tanto, también se encuentran disponibles a través del submenú Geo estadística. La geo estadística brinda herramientas para la exploración y caracterización estadística de datos puntuales de muestras. También provee un número de técnicas para la

interpolación de superficies a partir de dichos datos. Dentro de estos, el Método de Kriging Ordinario es el más conocido.

Varias técnicas de interpolación fueron introducidas en el apartado Interpolación de Superficies. A diferencia de éstas, las técnicas geo estadísticas permiten incorporar información acerca de los patrones de continuidad espacial en el modelo de interpolación y también producir superficies que incluyen artefactos de variación local. Los métodos permiten un alto grado de flexibilidad en la detección y definición de estructuras que describen la naturaleza de un grupo de datos. Es más, se puede ensamblar un grupo de estructuras, cada una de las cuales describe un aspecto del grupo de datos.

Con esta flexibilidad, sin embargo, también se genera cierto riesgo. Dentro de un mismo grupo de datos es posible producir muchas superficies, todas muy diferentes y a su vez razonablemente representativas de la realidad. El entendimiento y respeto, por las suposiciones subyacentes de estas técnicas, son esenciales si los resultados deben brindar información significativa para cualquier análisis.

La interfase Kriging y Simulación utiliza el modelo desarrollado en las interfaces Modelador de Dependencia Espacial y Ajuste del Modelo para interpolar una superficie. El modelo se emplea para derivar información sobre la continuidad espacial que define cómo se van a ponderar los datos de muestra cuando se combinan para producir los valores para los puntos desconocidos. Los pesos asociados con puntos muestrales se determinan por la dirección y la distancia con respecto a otros puntos conocidos, así como también por el número y carácter de los puntos de datos en una vecindad local definida por el usuario.

Luego se generan archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectorial anteriormente creados aplicando el método de interpolación Kriging. Los pasos a seguir para la obtención de los mapas de valores mínimos, medios y máximos esperados de precipitación para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años son:

1. Ejecutar el módulo Kriging, en el menú GIS Analysis elegir el submenú SurfaceAnalysis, seleccionar Interpolation, hacer clic sobre Kriging y finalmente en *Kriging and Simulation* como se observa en la Figura 40.
2. En el cuadro de diálogo Kriging and Simulation se completarán las opciones como se muestra en la Figura 41.
3. Al usar una máscara se está delimitando el análisis solo a los pixeles que se encuentran dentro de la provincia (Figura 42).

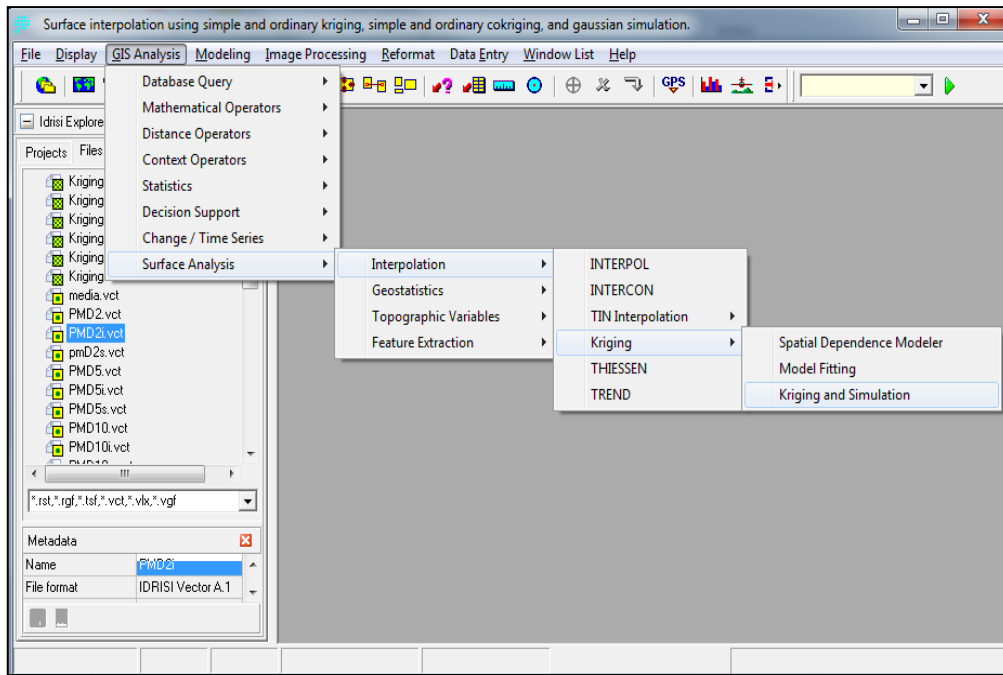


Figura 40: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation

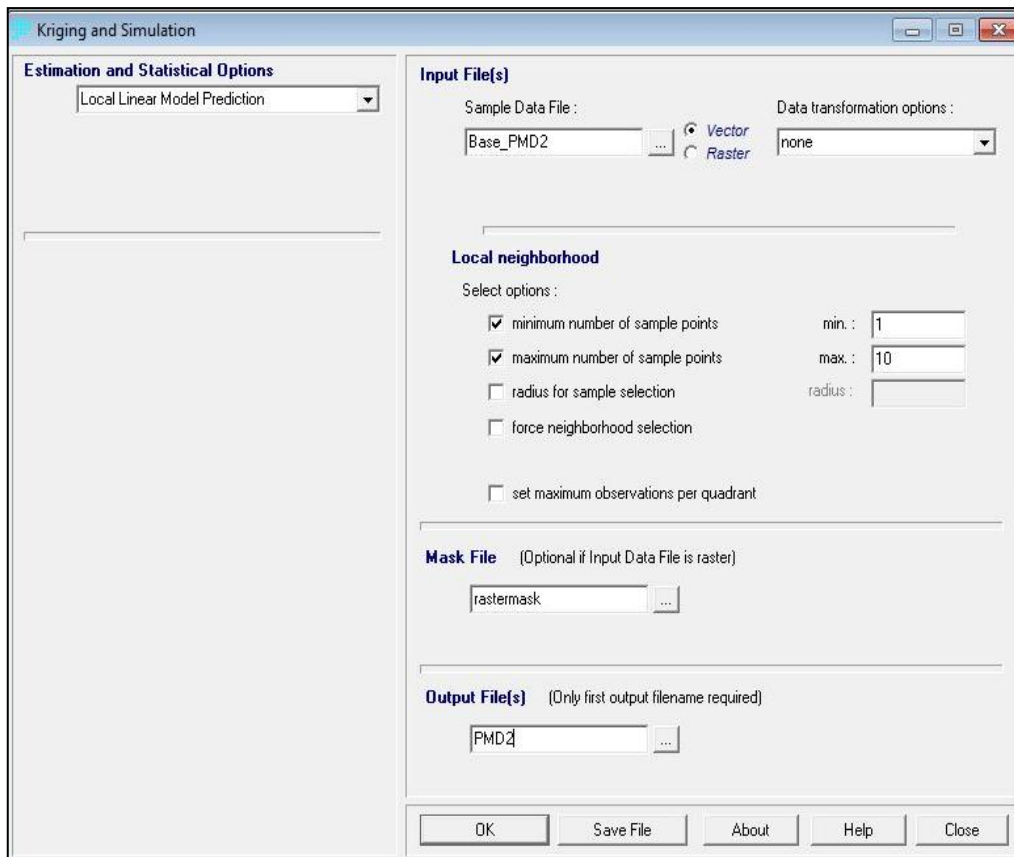


Figura 41: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation

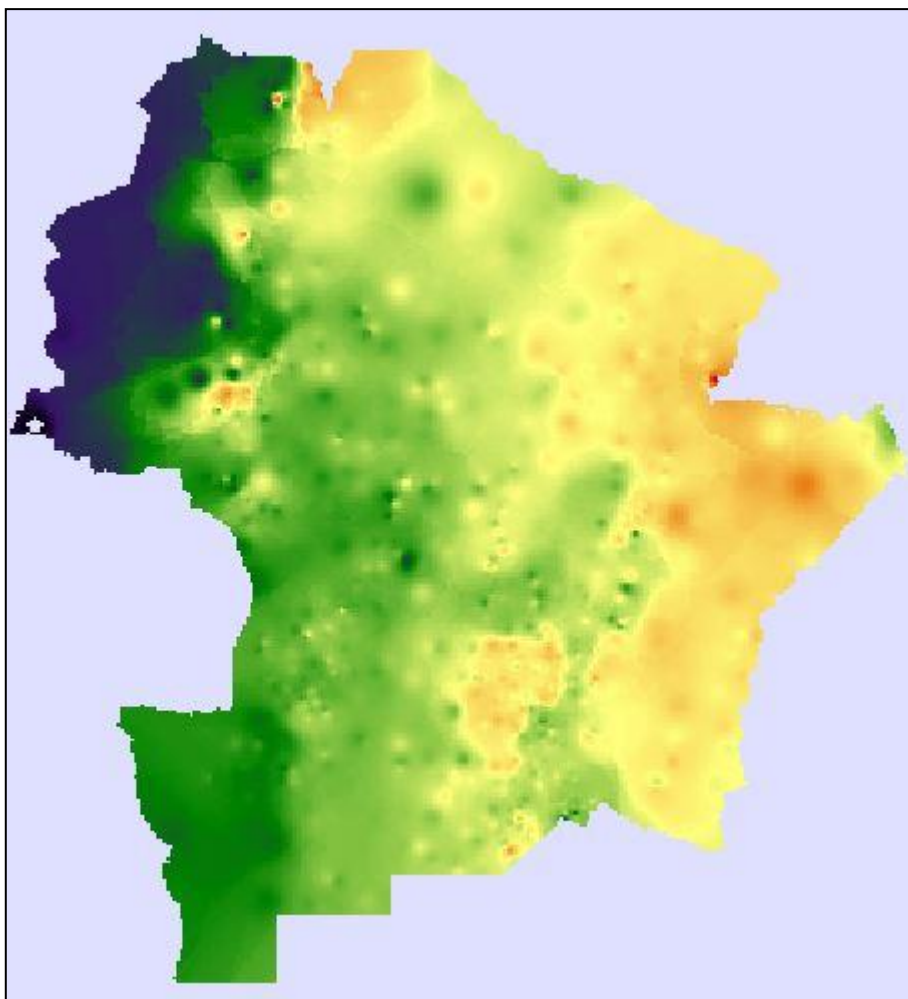


Figura 42: Raster interpolado por el método Kriging para T=2 años

A diferencia de trabajos anteriores, no se realiza un mapa tendencial a partir de los obtenidos de la interpolación de Kriging ya que el polinomio tendencial que debería ajustarse debería ser del orden de 70 (para que se cumpla el principio de parsimonia que dice que la relación entre la cantidad de datos y el orden del ajuste debe ser del orden de 15) y al día de la fecha no se cuenta con una herramienta para realizar esta tarea (IDRISI permite hasta un orden de ajuste de 9).

En trabajos anteriores (Calderoni, 2014), se demostró que si se ajustan polinomios de orden bajo (menores a 10) a bases de datos extensas (más de 200 puestos pluviométricos), se incurre en un error significativo y apreciable al realizar los mapas de lluvia diaria. Es por esta razón que la herramienta generada final son los mapas obtenidos de la interpolación de Kriging.

6.6. MAPAS DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.

Por último, desde la Figura 43 a la Figura 49 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados para las provincias analizadas (Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Formosa, Chaco, Córdoba, Santa Fe, San Luis, Santiago del Estero, Corrientes y Entre Ríos):

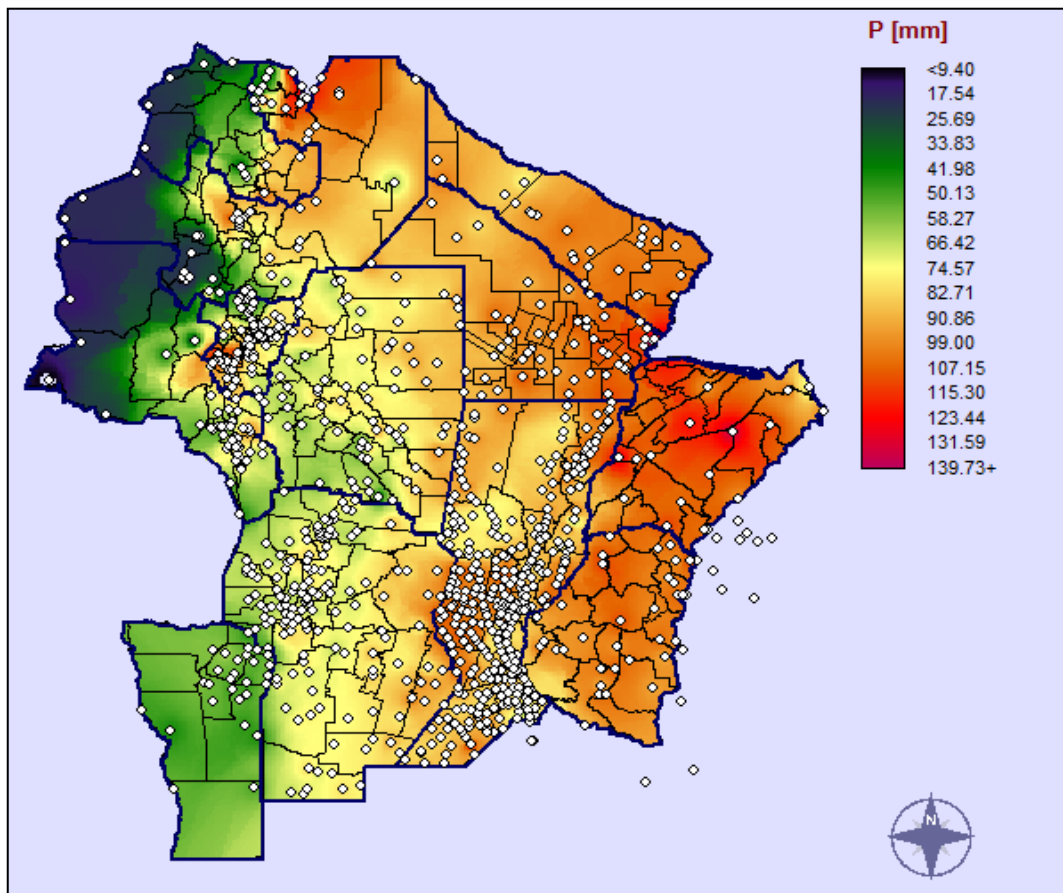


Figura 43: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Período de retorno T= 2 años [mm]

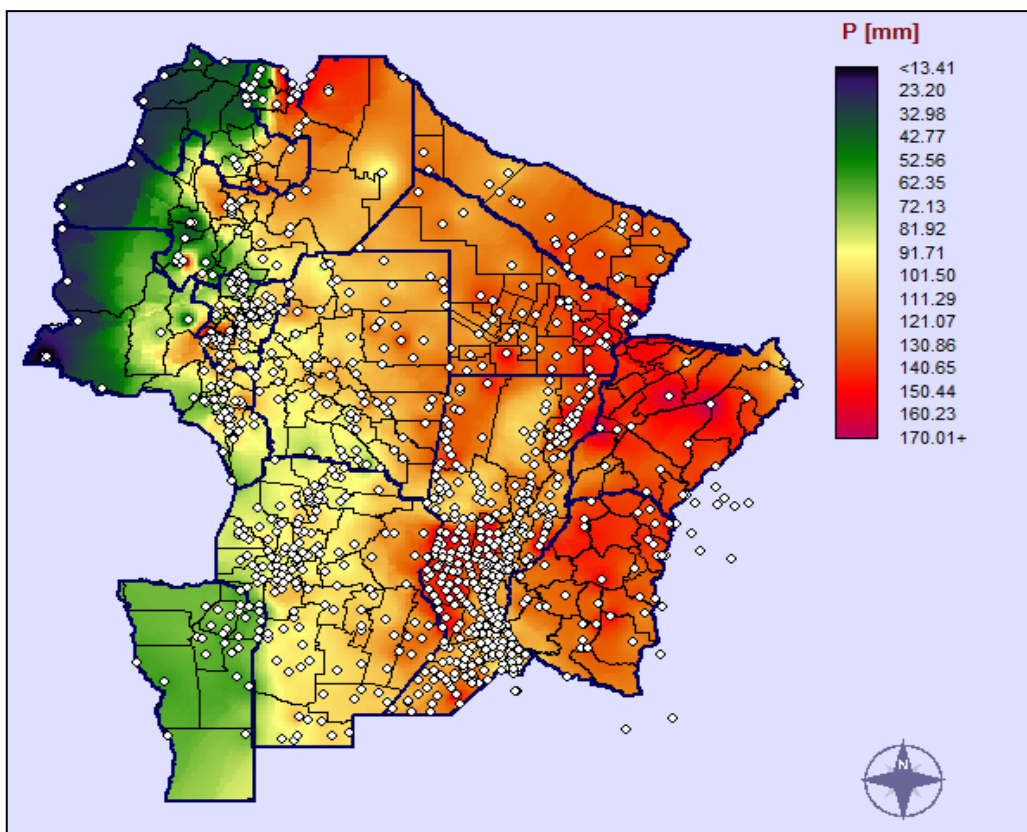


Figura 44: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno $T= 5$ años [mm]

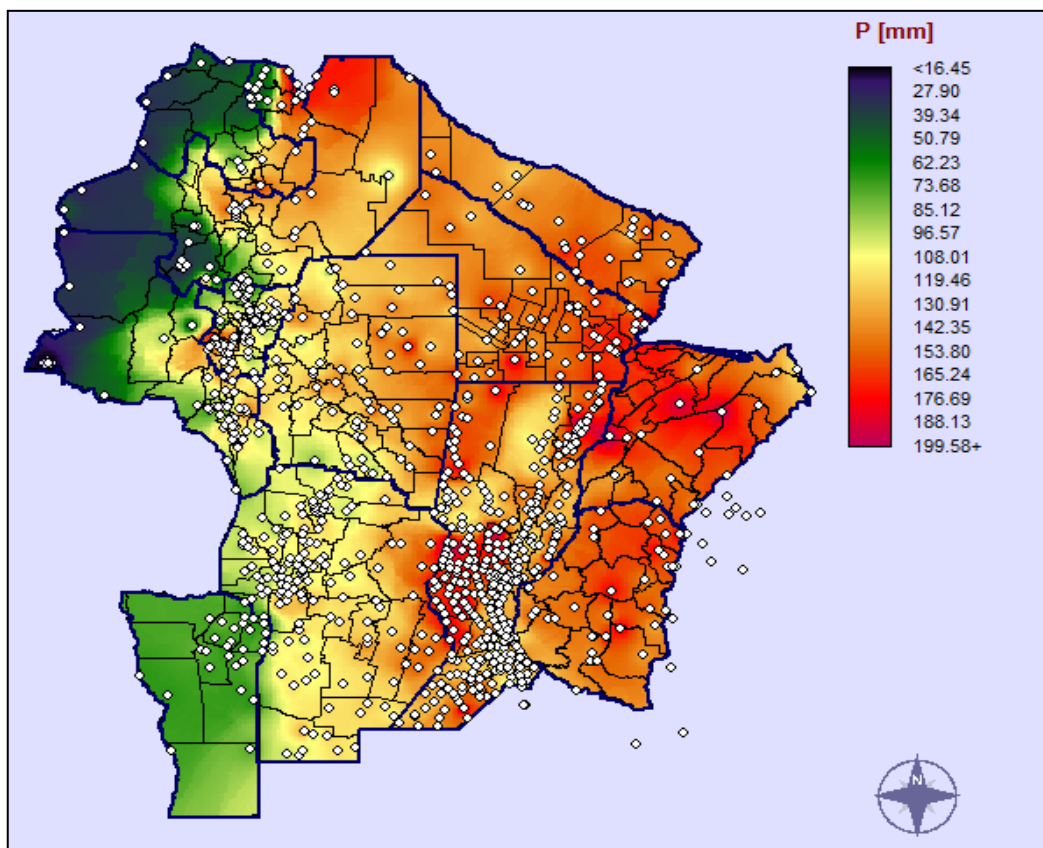


Figura 45: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno $T= 10$ años [mm]

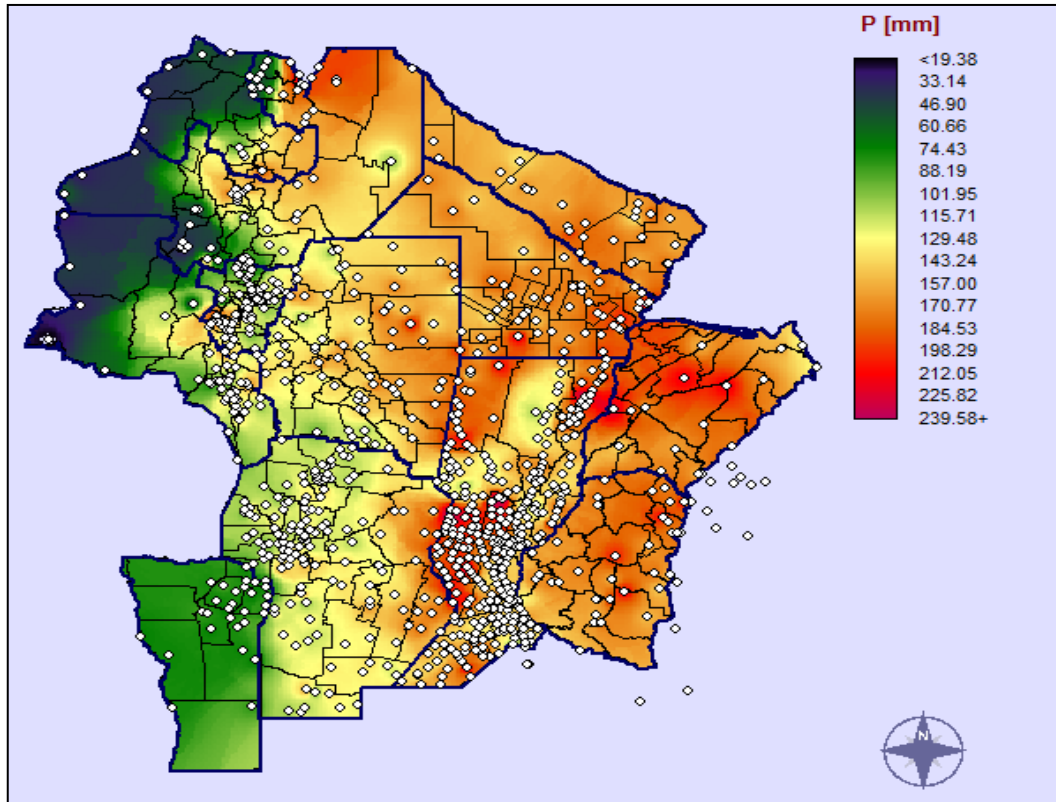


Figura 46: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 20 años [mm]

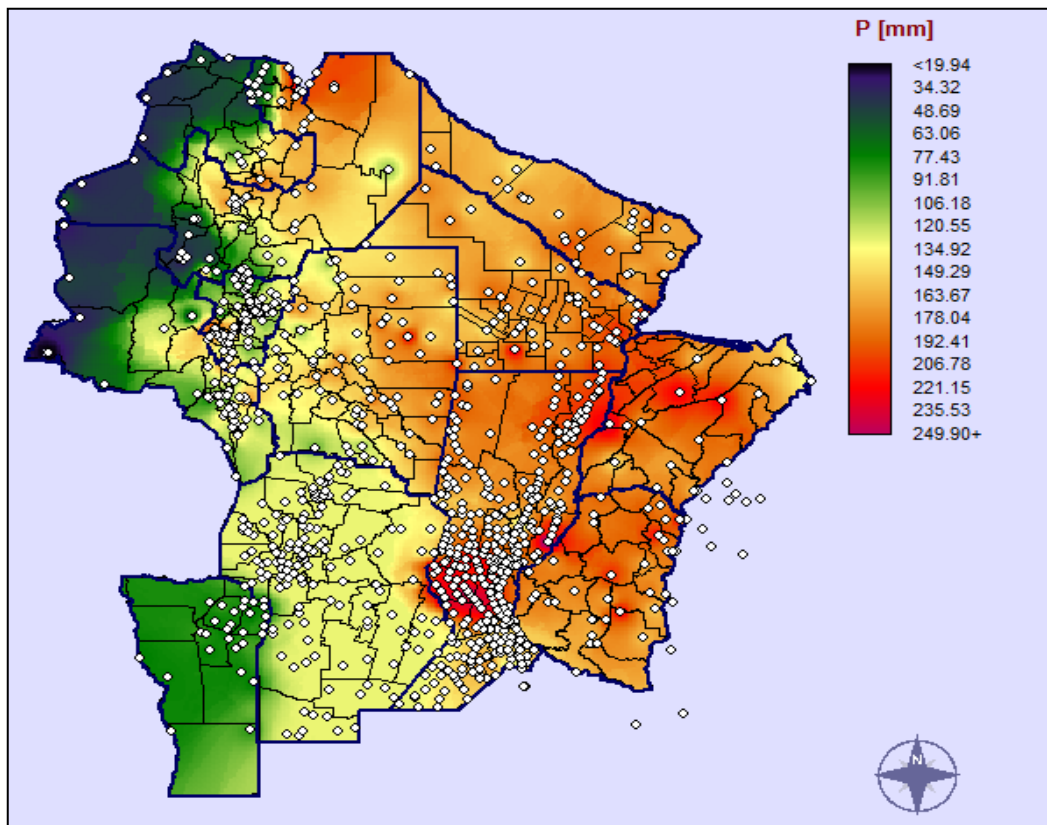


Figura 47: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]

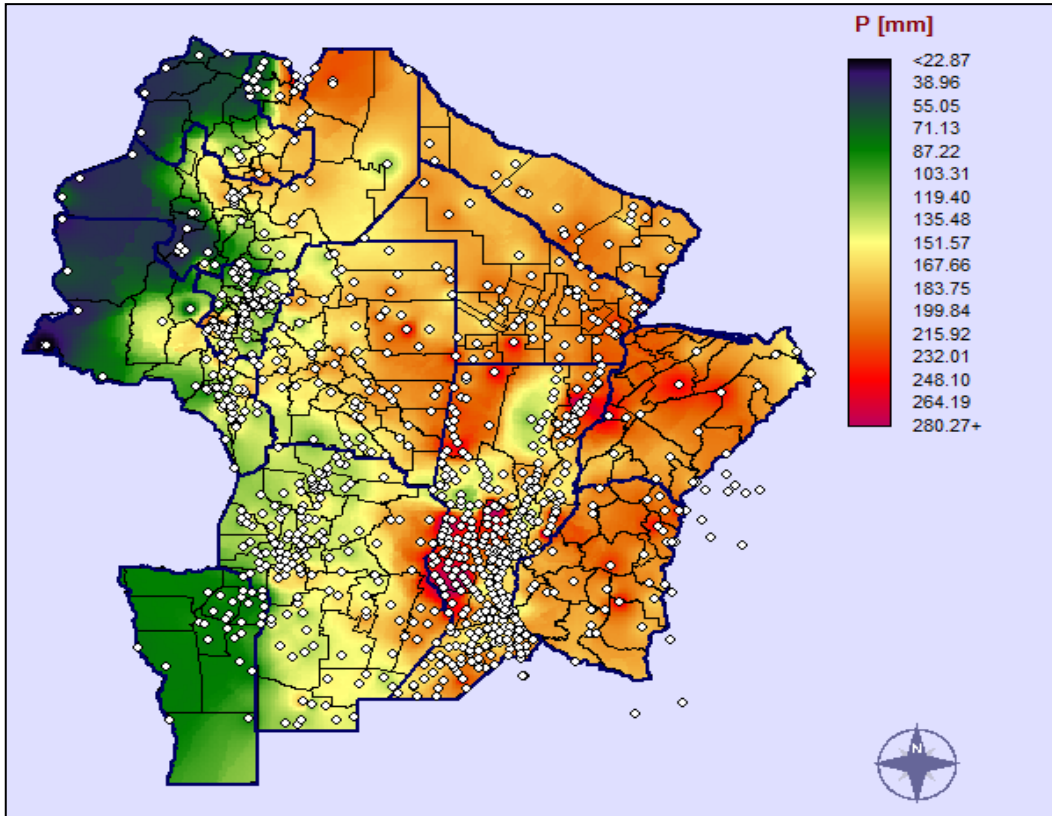


Figura 48: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 50 años [mm]

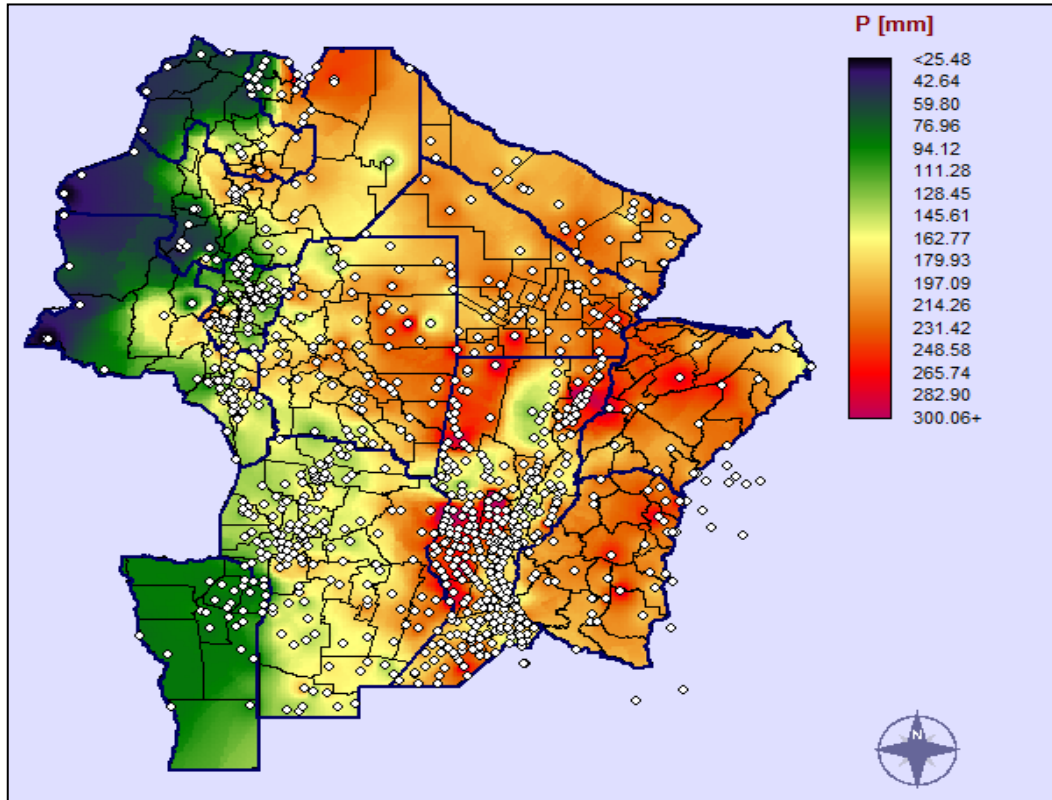


Figura 49: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para la provincia de Entre Ríos para un Periodo de retorno T= 100 años [mm]

Visualizando los mapas tendenciales generados se observa que en todos los casos las láminas de lluvia más altas se dan al este de la Republica Argentina en las provincias de Corrientes y Entre Ríos. Los valores de lámina disminuyen a medida que nos desplazamos hacia el oeste; ya que allí los climas son más áridos y por lo tanto más secos.

Si se hace un zoom de la provincia de Entre Ríos se puede ver que las mayores láminas de lluvias se dan al noreste disminuyendo hacia el suroeste.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

7.1. INTRODUCCIÓN.

Este capítulo se compara los mapas de lluvia máxima diaria de la provincia de Entre Ríos generados en el Capítulo 6 con un estudio de antecedentes disponibles.

Por ello se cuenta con información correspondiente a un trabajo previo en el que se describe: “Procedimientos para la Estimación de Tormentas de Diseño para la Provincia de Entre Ríos” (Zamanillo et al., 2009). En ese estudio, partiendo de una serie de registros históricos de precipitación máxima diaria, aportados por pluviómetros distribuidos en toda la provincia de Entre Ríos, utilizando para esto una metodología de regionalización con lo que se llega a una serie de mapas de isohietas de precipitaciones máximas diarias para tiempos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años.

También se cuenta con un mapa de isohietas de lluvia total media anual en la República Argentina provisto por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Si bien la variable (lluvia media total anual) presentada en este antecedente no es la misma que la analizada en este trabajo, lo que se busca es realizar una comparación cualitativa entre ambos mapas (describiendo la evolución espacial).

7.2. COMPARACIÓN CUALITATIVA ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS CON LA METODOLOGIA PROPIA Y LA APLICADA EN EL TRABAJO “PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN DE TORMENTAS DE DISEÑO PARA LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS”.

A continuación, a modo de ejemplo, se muestra el mapa de isohietas de precipitaciones máximas diarias para un retorno de 5 años construido por Zamanillo en el 2009 (Ver Figura 50).

Según la Figura 51 las máximas precipitaciones se dan al norte de la provincia de Entre Ríos (150mm), habiendo también máximos locales que se dan en el interior de la misma y van disminuyendo hacia el sur (110mm).

Al visualizar ambos mapas, se observa que si bien se aplicaron metodologías diferentes para su confección, los valores de lámina máxima diaria son del mismo orden de magnitud y la distribución espacial de las láminas es similar en ambos casos.

7.3. COMPARACIÓN CUANTITATIVA ENTRE MAPAS GENERADOS EN ESTE TRABAJO Y EL ANTECEDENTE ELABORADO POR ZAMANILLO, 2009.

7.3.1. Introducción.

Tal como se anticipó en el capítulo 1, el presente trabajo forma parte de un proyecto nacional cuyo objetivo es estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes recurrencias en todo el territorio de la Argentina.

Previamente a la realización de este trabajo, se habían analizado siguiendo la misma metodología que la que se usó en el presente trabajo las provincias de: Córdoba, San Luis, Santa Fe, Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco, Formosa y Corrientes.

A continuación se compararán dos series de mapas: los realizados en Entre Ríos en este trabajo (previamente se aisló la provincia de Entre Ríos de las demás) con los logrados por Zamanillo. Entre ambas series de mapas se realiza un contraste de la variación espacial de los mismos y se buscan establecer diferencias y explicar sus razones.

Tal como se anticipó en el capítulo 1, Zamanillo analizó series históricas de precipitaciones de varios pluviómetros distribuidos en la provincia de Entre Ríos y aplicando una metodología de regionalización obtuvo mapas de precipitación máxima diaria para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años.

A continuación se presenta a modo de ejemplo el mapa de T=50 años (Figura 52).

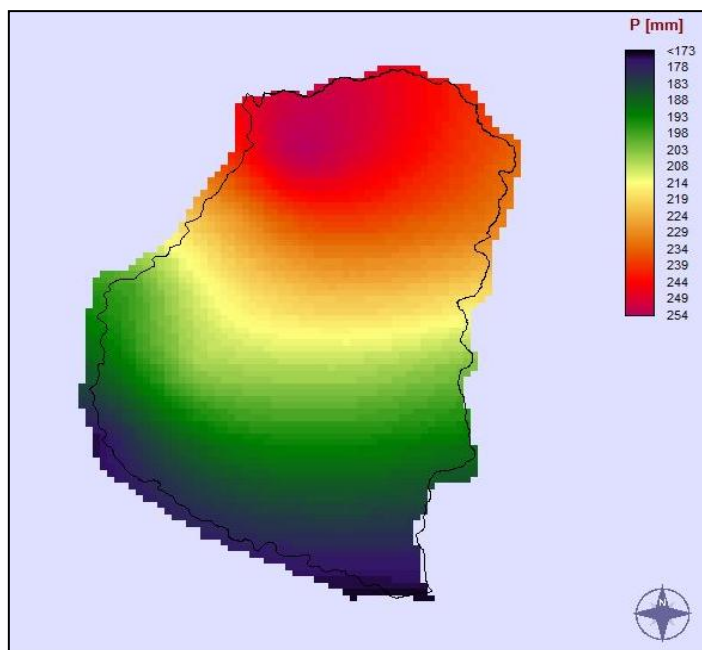


Figura 52: Mapa de Precipitaciones Máximas Diarias elaborado por Zamanillo et al. (2009) para un T=50 años.

En primer lugar para poder realizar la comparación entre los mapas, previamente se tuvo que aislar la provincia de Entre Ríos de las demás provincias vecinas que habían sido analizadas en trabajos anteriores (Córdoba, San Luis, Santa Fe, Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco, Formosa y Corrientes).

A continuación, a modo de ejemplo, se muestra en la Figura 53 el mapa aislado de precipitaciones máximas diarias para un recurrencia de T=50 años.

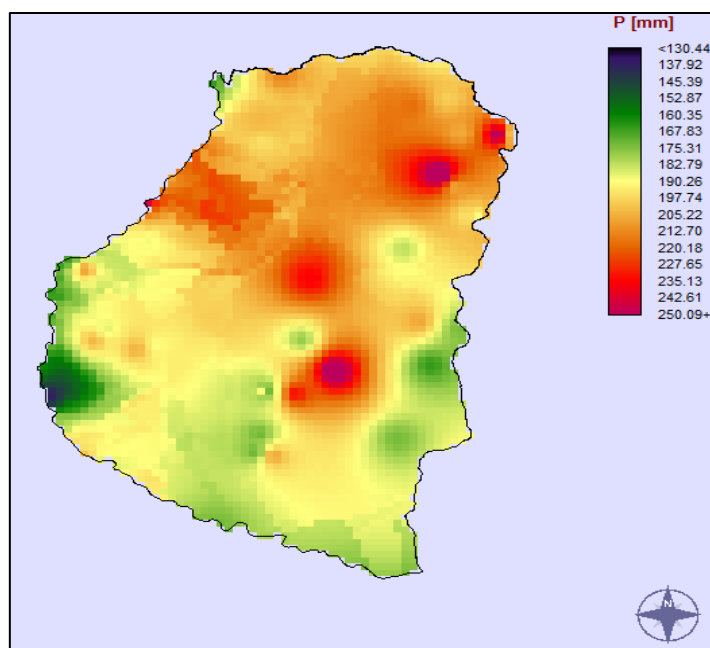


Figura 53: Mapa de Precipitaciones Máximas Diarias de la provincia de Entre Ríos elaboradas en este trabajo para un T=50 años.

Al observar las dos últimas figuras presentadas, se observa claramente que los valores máximos de lámina de lluvia máxima diaria asociada a una recurrencia de 50 años son del orden de los 250 mm y se dan en el norte de la provincia (y en algunos puntos locales del centro en el mapa de Kriging). Además, los mínimos son del orden de 150 mm y se dan en la zona sur de la provincia.

A continuación, se comparan cuantitativamente las diferencias entre ambos mapas.

7.3.2. Metodología utilizada para la comparación.

Para estudiar las diferencias existentes entre los dos mapas, se procedió de la siguiente manera: para poder analizar la variación espacial de la lámina de lluvia, lo que se hizo fue trabajar pixel a pixel con ambas series de mapas.

La operación realizada para evaluar las diferencias entre los mapas fue la siguiente:

$$\text{Diferencia Relativa} = \frac{h_{\text{Zamanillo}} - h}{h}$$

Ecuación 27

Siendo:

- $h_{\text{Zamanillo}}$: lámina de lluvia máxima diaria asociada a una recurrencia dada calculada en un determinado pixel en el trabajo de Zamanillo et al (2009)
- h : lámina de lluvia máxima diaria asociada a una recurrencia dada calculada en un determinado pixel en este trabajo

Al realizar este cálculo pixel a pixel se obtiene un mapa que cuantifica estas diferencias relativas. Si esa diferencia es nula, quiere decir que en ese pixel ambos mapas arrojan el mismo valor de lámina. Por el contrario, si arroja un valor positivo, en ese pixel el mapa de Zamanillo arroja un valor de lámina superior al obtenido con este trabajo y ocurre lo opuesto en caso que el pixel arroje un valor negativo.

A continuación se presentan los mapas de diferencias relativas obtenidos al calcularlas para las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años:

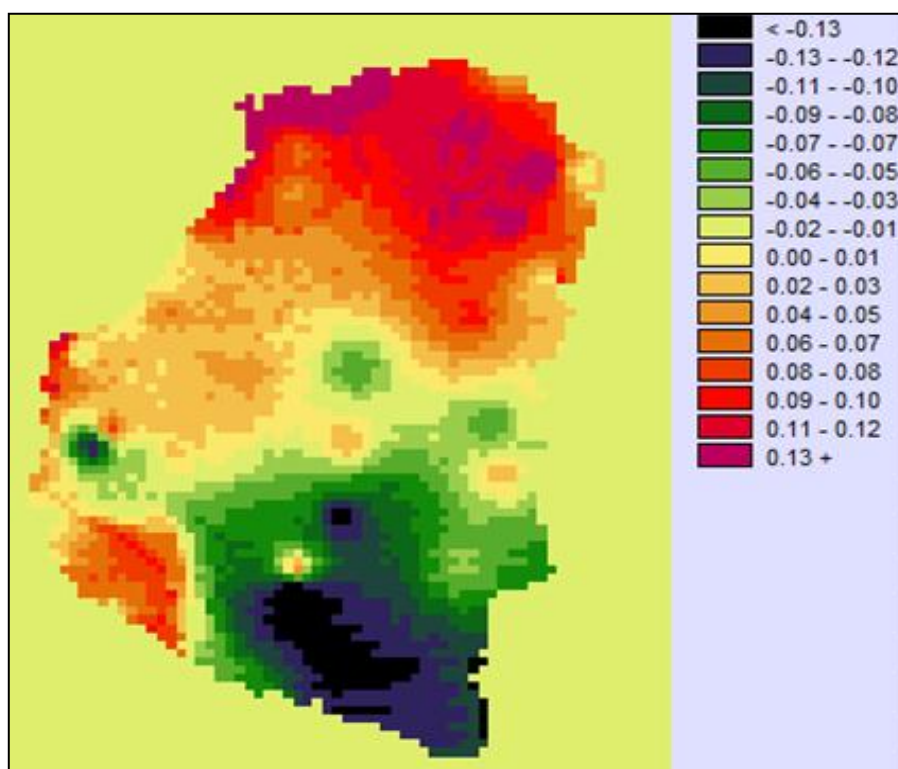


Figura 54: Mapa de Diferencias Relativas para T=2 años.

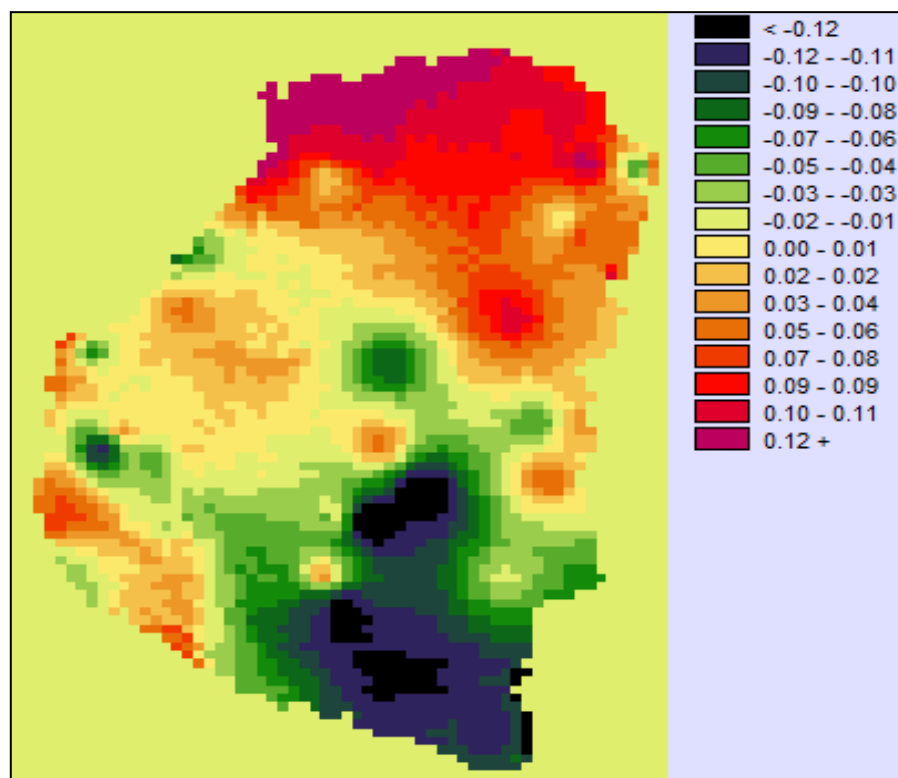


Figura 55: Mapa de Diferencias Relativas para T=5 años.

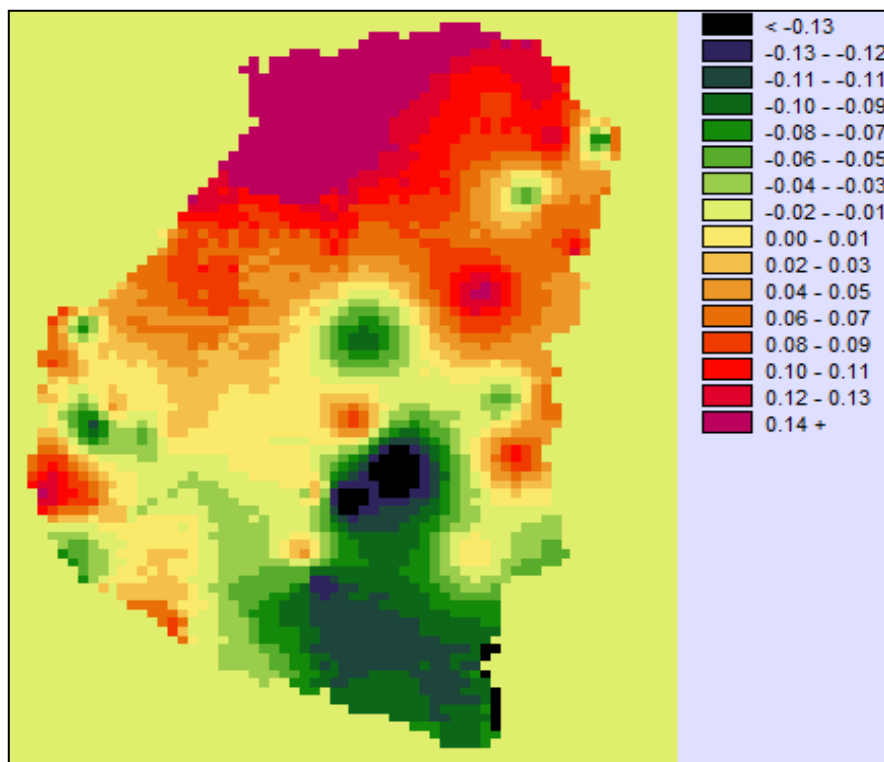


Figura 56: Mapa de Diferencias Relativas para T=10 años.

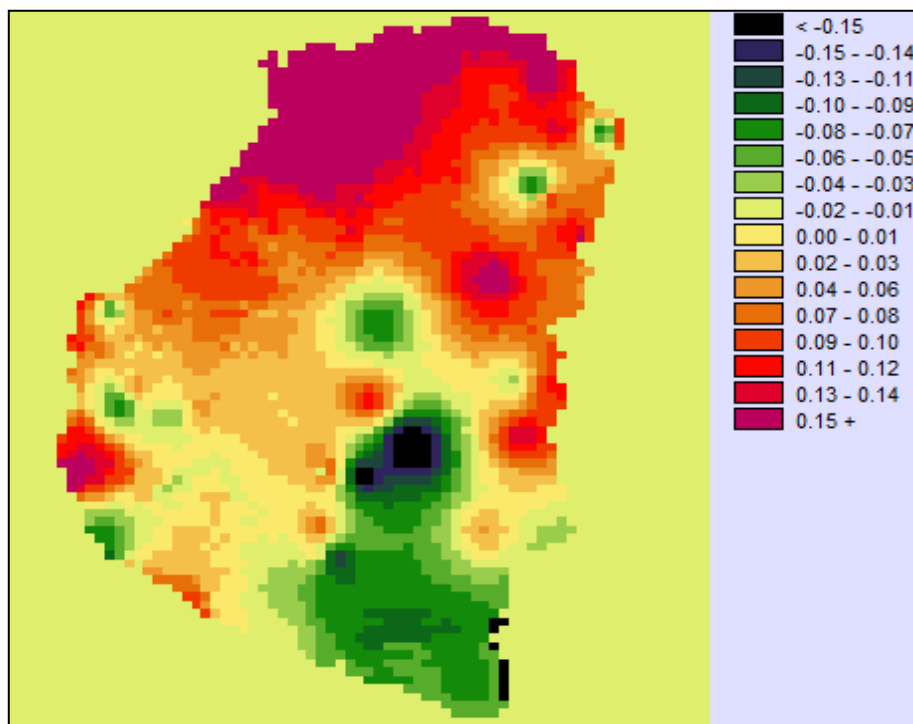


Figura 57: Mapa de Diferencias Relativas para T=20 años.

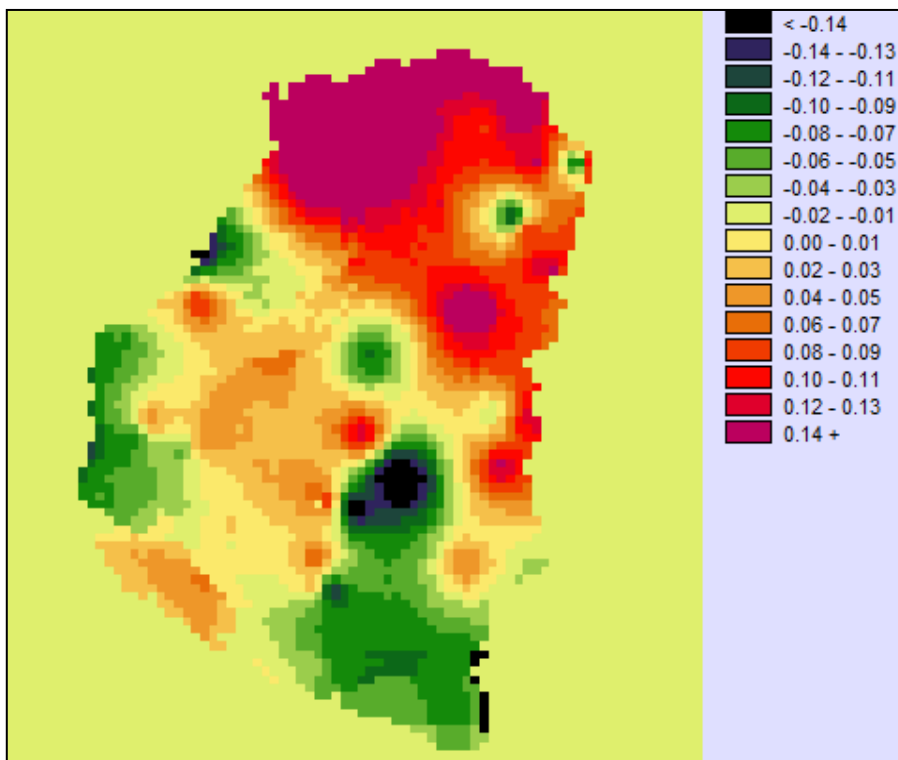


Figura 58: Mapa de Diferencias Relativas para T=25 años.

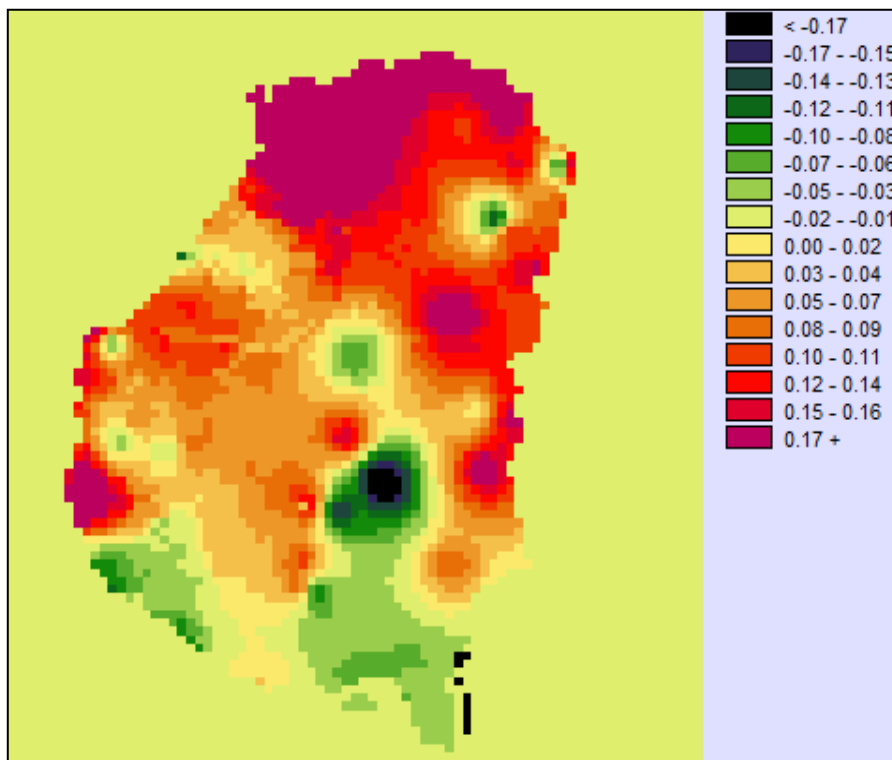


Figura 59: Mapa de Diferencias Relativas para T=50 años.

Analizando las figuras anteriores (desde la Figura 54 a la Figura 59), se puede observar que:

- a) Las máximas diferencias relativas se dan en el norte (y en algunos puntos locales en el interior de la provincia). En esas zonas, el mapa de la provincia de Entre Ríos generado por Zamanillo et al (2009) arroja un valor de lámina superior al obtenido en el presente trabajo. Además se aprecia que a medida que aumenta el tiempo de recurrencia estas zonas son mayores.
- b) Las mínimas diferencias relativas se dan para todas las recurrencias en un punto local en el centro-sur de la provincia. Esa localización es coincidente con la estación Los Pinos (código interno 15). En esa zona, el mapa generado en este trabajo arroja un valor de lámina significativamente superior al obtenido por los mapas de Zamanillo.

Otra actividad realizada para cuantificar las diferencias relativas halladas, fue graficar histogramas de frecuencia sobre los mapas obtenidos al calcular las diferencias relativas porcentuales para las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años. (de la Figura 60 a la Figura 65).

A continuación se presentan los histogramas generados mediante el programa rastermasker:

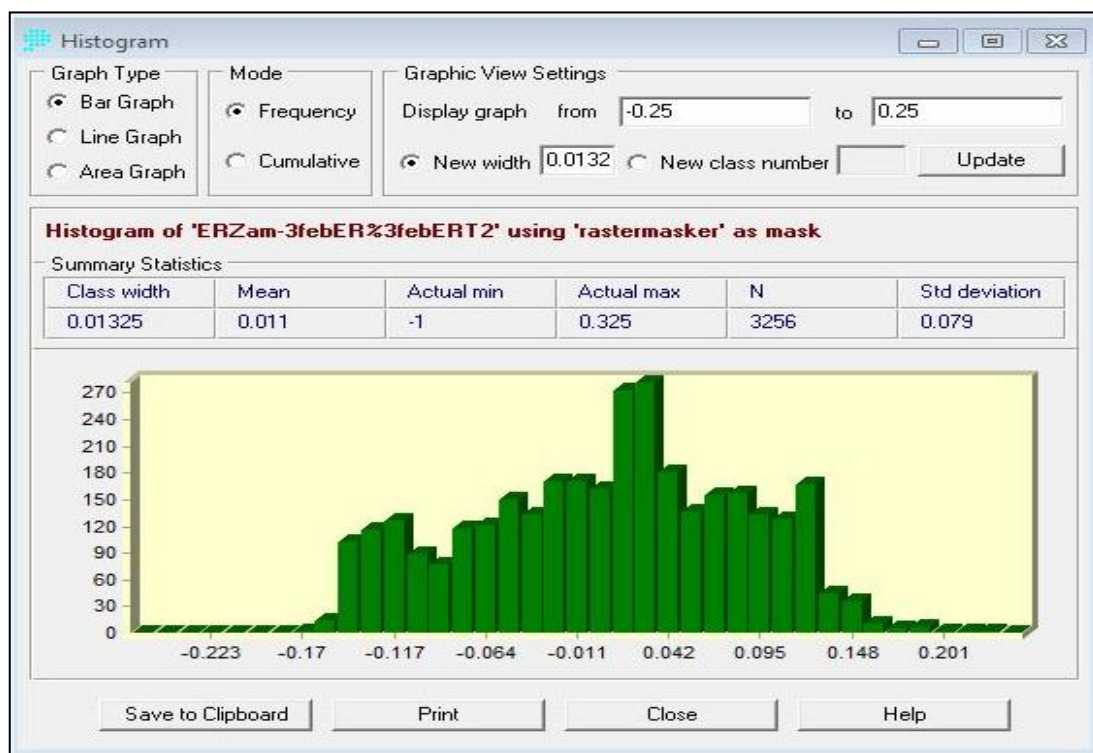


Figura 60: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=2 años.

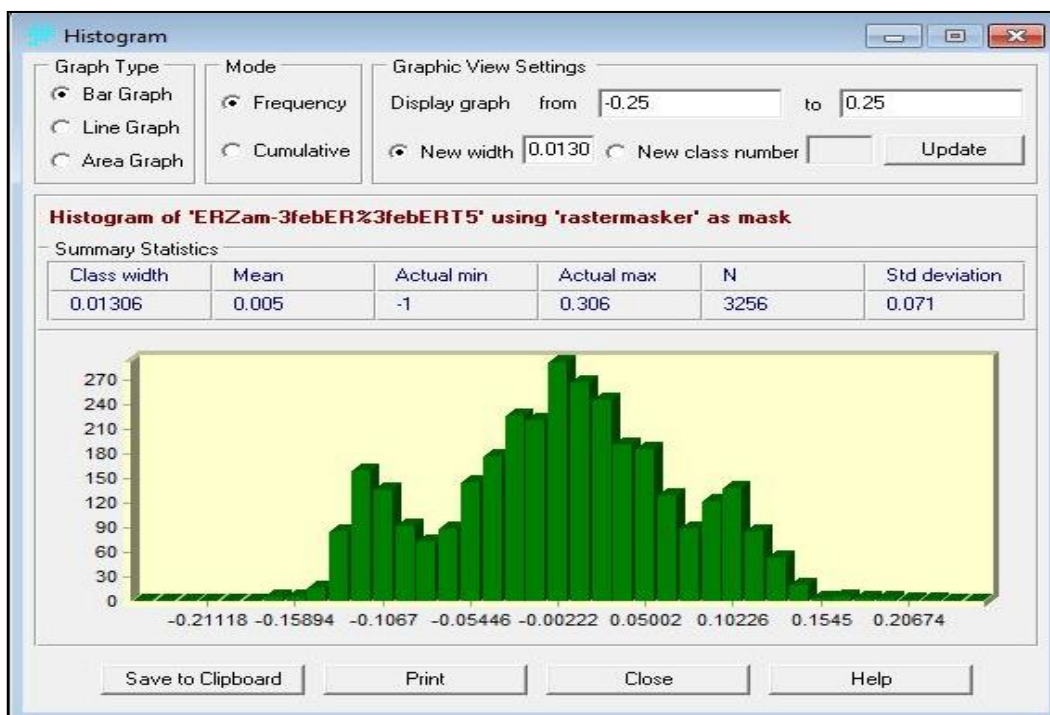


Figura 61: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=5 años.

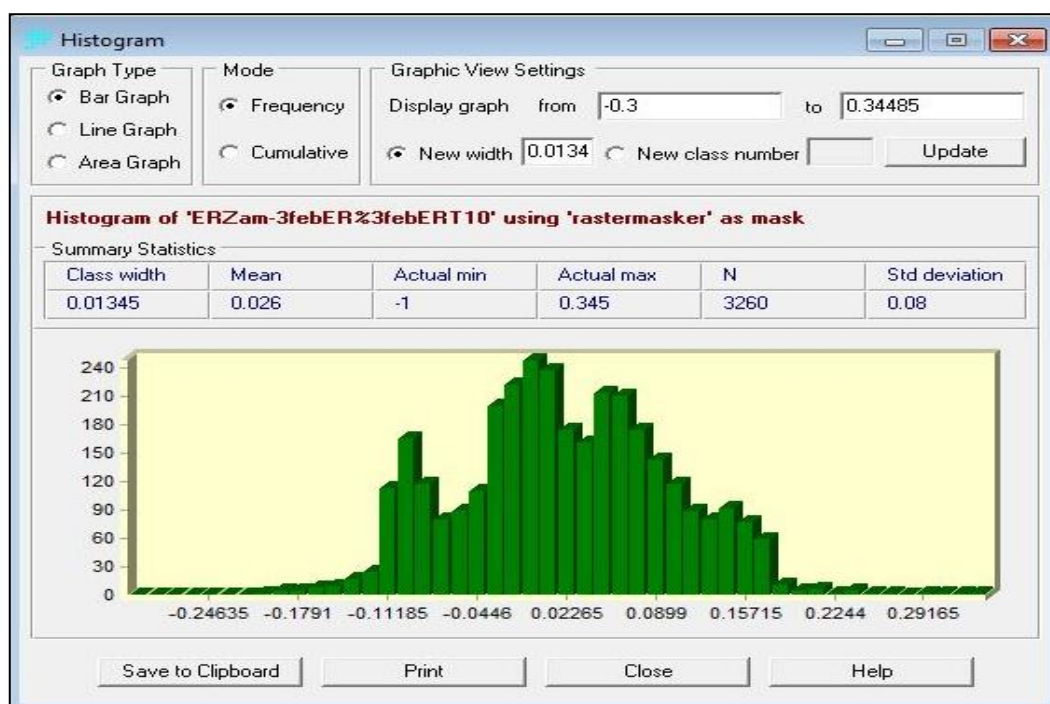


Figura 62: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=10 años.

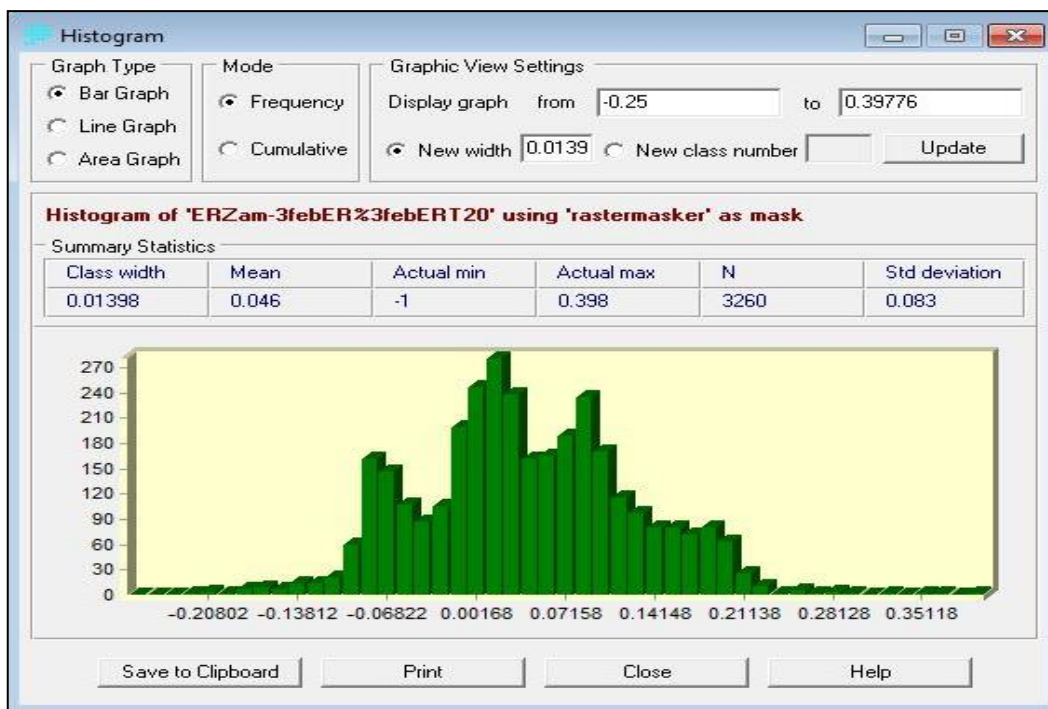


Figura 63: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=20 años.

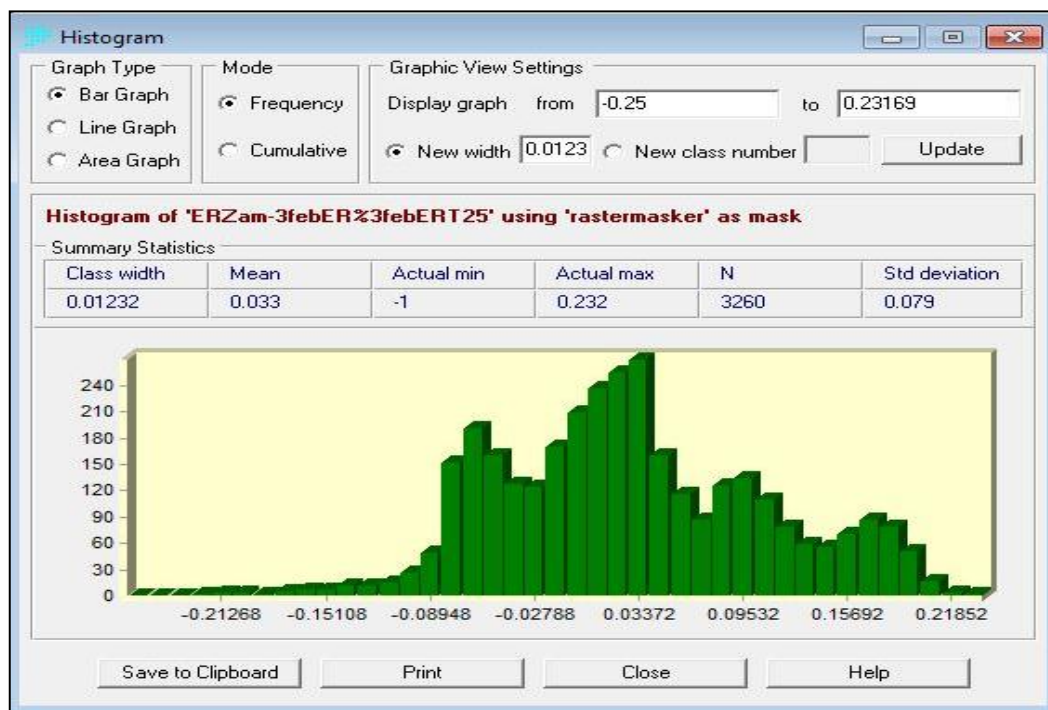


Figura 64: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=25 años.

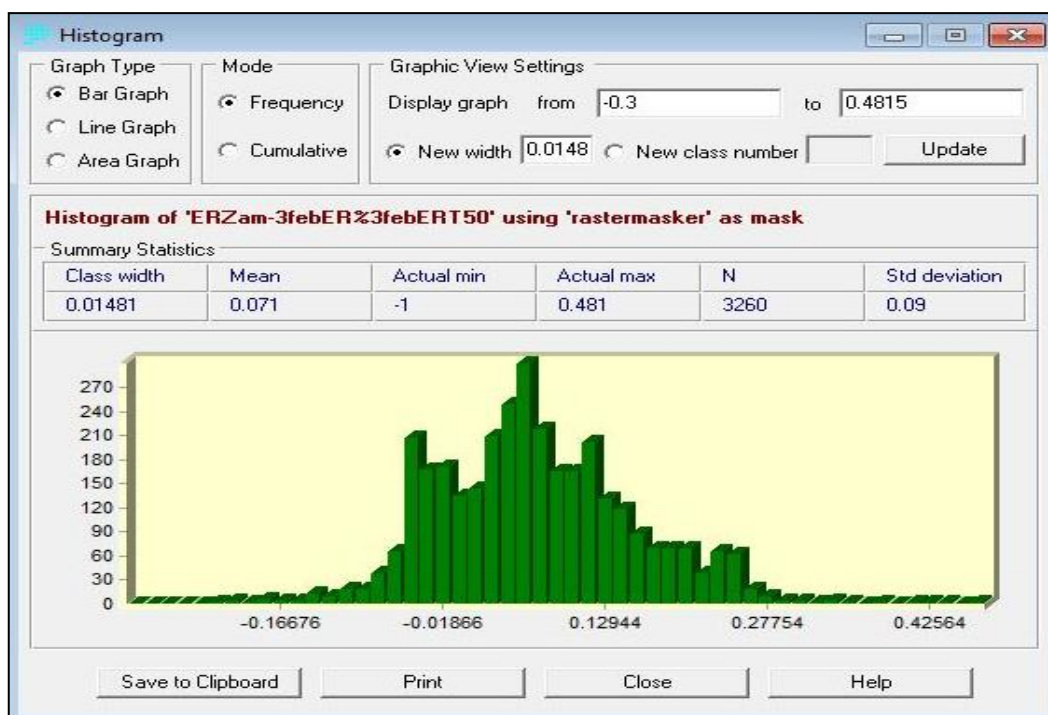


Figura 65: Histograma de Frecuencia sobre el mapa obtenido al calcular las diferencias relativas porcentuales para una recurrencia de T=50 años.

Para analizar los resultados generados por los histogramas, se consideró que una diferencia relativa es significativa si la misma es mayor o menor al 15%. A partir de este valor umbral, se cuantificaron la cantidad de pixeles que quedan fuera de dicho intervalo (del $\mp 15\%$), y los resultados encontrados se muestran en la Tabla 27:

Porcentaje de celdas	T [años]					
	2	5	10	20	25	50
Menor que -15%	0.4	0.5	0.8	1	0.9	0.8
Mayor que 15%	1.5	0.6	5.3	9.6	9	16.1
TOTAL	1.9	1.1	6.1	10.6	9.9	16.9

Tabla 27: Diferencias Relativas Porcentuales para $\pm 15\%$ de diferencia entre el mapa generado por Zamanillo et al (2009) y el mapa del presente trabajo.

A partir de los datos de la Tabla 27, se presentan a continuación en forma de gráfico (Figura 66) la variación de los porcentajes de celdas fuera del intervalo $\mp 15\%$ en los mapas de diferencias relativas porcentuales en relación a las diferentes recurrencias:

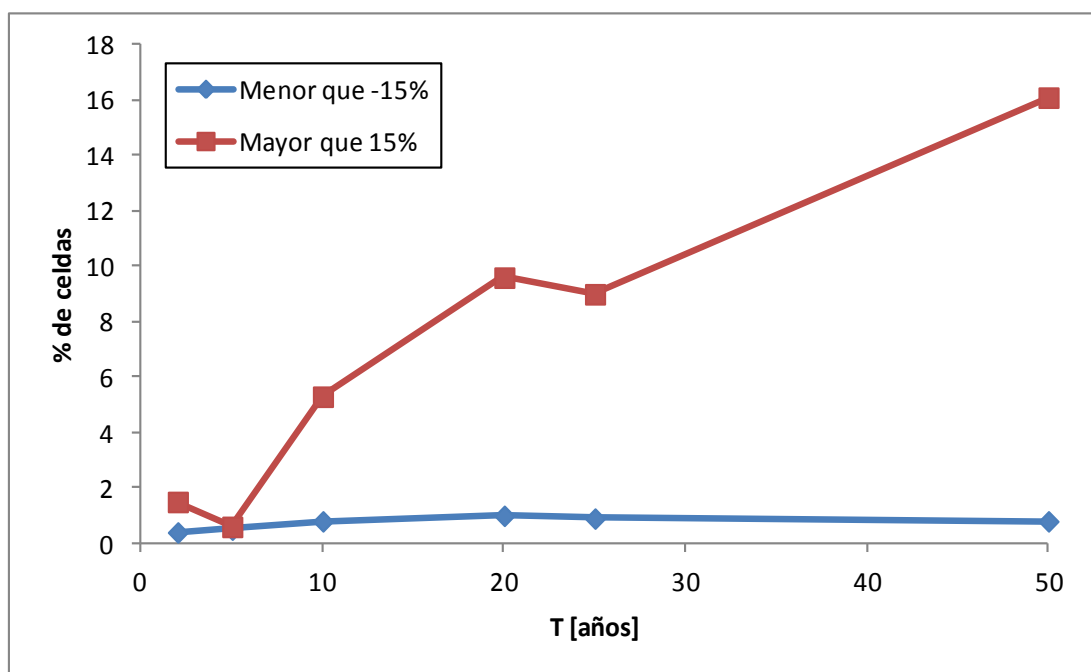


Figura 66: Grafica que muestra la variación de las diferencias porcentuales menor que -15% y mayor que 15% a medida que varía el periodo de recurrencia.

De la última figura (Figura 66), lo que puede establecerse es:

- Si se analizan los valores cuya diferencia relativa porcentual es menor al -15%, vemos que para todas las recurrencias esto ocurre en menos del 1% de las celdas. Si visualizamos nuevamente los mapas de diferencias relativas, se observa que esas celdas son las del punto local de la estación Los Pinos, donde las láminas máximas de lluvia obtenidas por Zamanillo et al (2009) resultaron significativamente inferiores a las alcanzadas en este trabajo.
- Si se analizan los valores cuya diferencia relativa porcentual es mayor al +15%, se observa que para las recurrencias más bajas (2 y 5 años), menos del 2% de las celdas poseen diferencias relativas significativas. Con esto se demuestra que las 2 series de mapas comparados asociados a 2 y 5 años de tiempo de retorno son muy similares.

Por el contrario, al ir incrementándose el tiempo de retorno, las celdas cuya diferencia relativa es significativa también crece. Para el caso de $T=50$ años, el 16% de las celdas arrojan diferencias relativas superiores al 15%.

La causa del incremento de las celdas con diferencias significativas al aumentar la recurrencia es el ajuste polinómico realizado por Zamanillo en sus mapas. Al realizar este ajuste tendencial en la provincia y no tener en cuenta estaciones pluviométricas en el norte y oeste de la provincia (ver Figura 25), el ajuste realizado en esa zona arrojó diferencias importantes respecto a los datos originales que arroja la interpolación de Kriging.

7.4. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS CON LA METODOLOGÍA PROPIA Y EL MAPA DE ISOHIETAS DE LLUVIA TOTAL MEDIA ANUAL EN LA REPUBLICA ARGENTINA PROVISTO POR EL INTA.

Si se agrupa la provincia de Entre Ríos a la base de datos nacional y se construyen los mapas de precipitaciones máximas diarias asociadas a distintas recurrencias de todas las provincias analizadas hasta la actualidad, se obtienen mapas como el mostrado en la Figura 67 . En dicha figura, a modo de ejemplo se presenta el mapa asociado a una recurrencia de T=25 años:

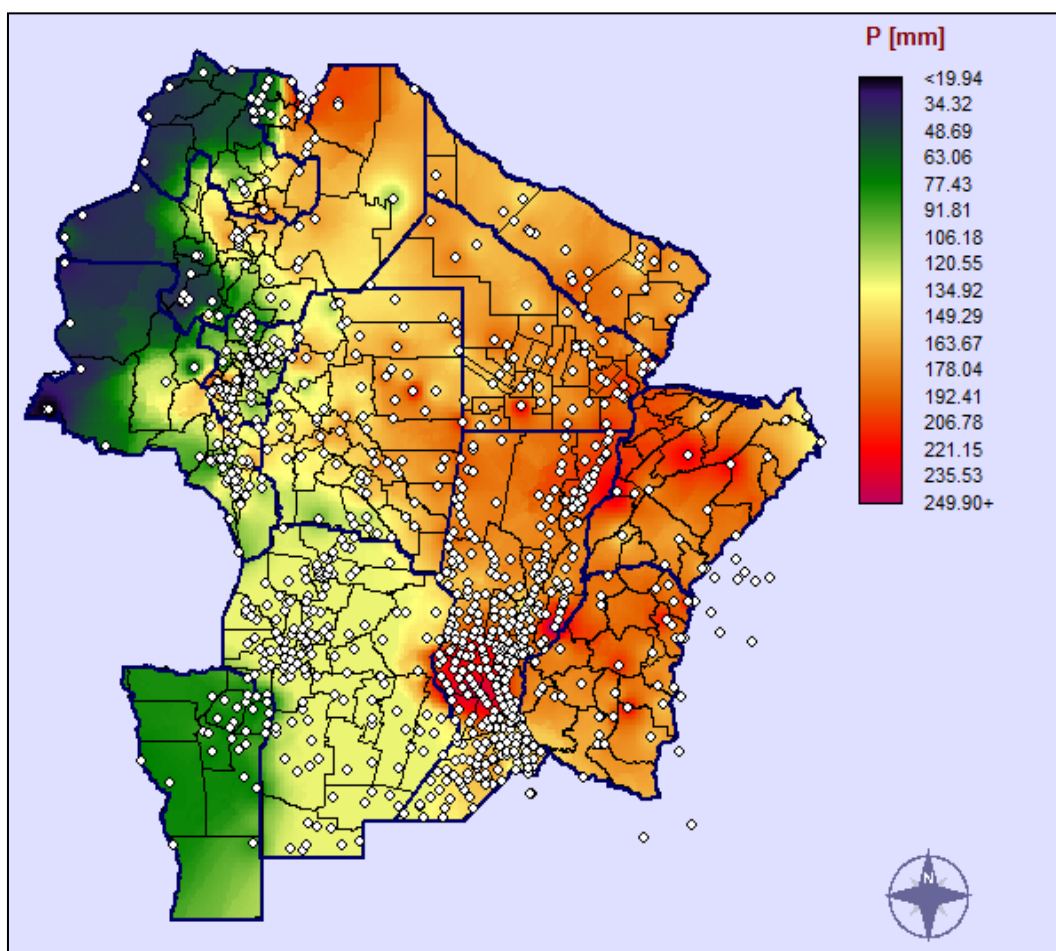


Figura 67: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]

De la última figura se observa que los máximos valores de precipitación se dan hacia el noreste de la República Argentina (zona húmeda) y estos valores van disminuyendo a medida que nos acercamos a la cordillera (zona seca), o sea hacia el oeste del país.

A continuación, en la Figura 68, se muestra el mapa de isohietas de lluvia total media anual en la República Argentina provisto por el INTA:

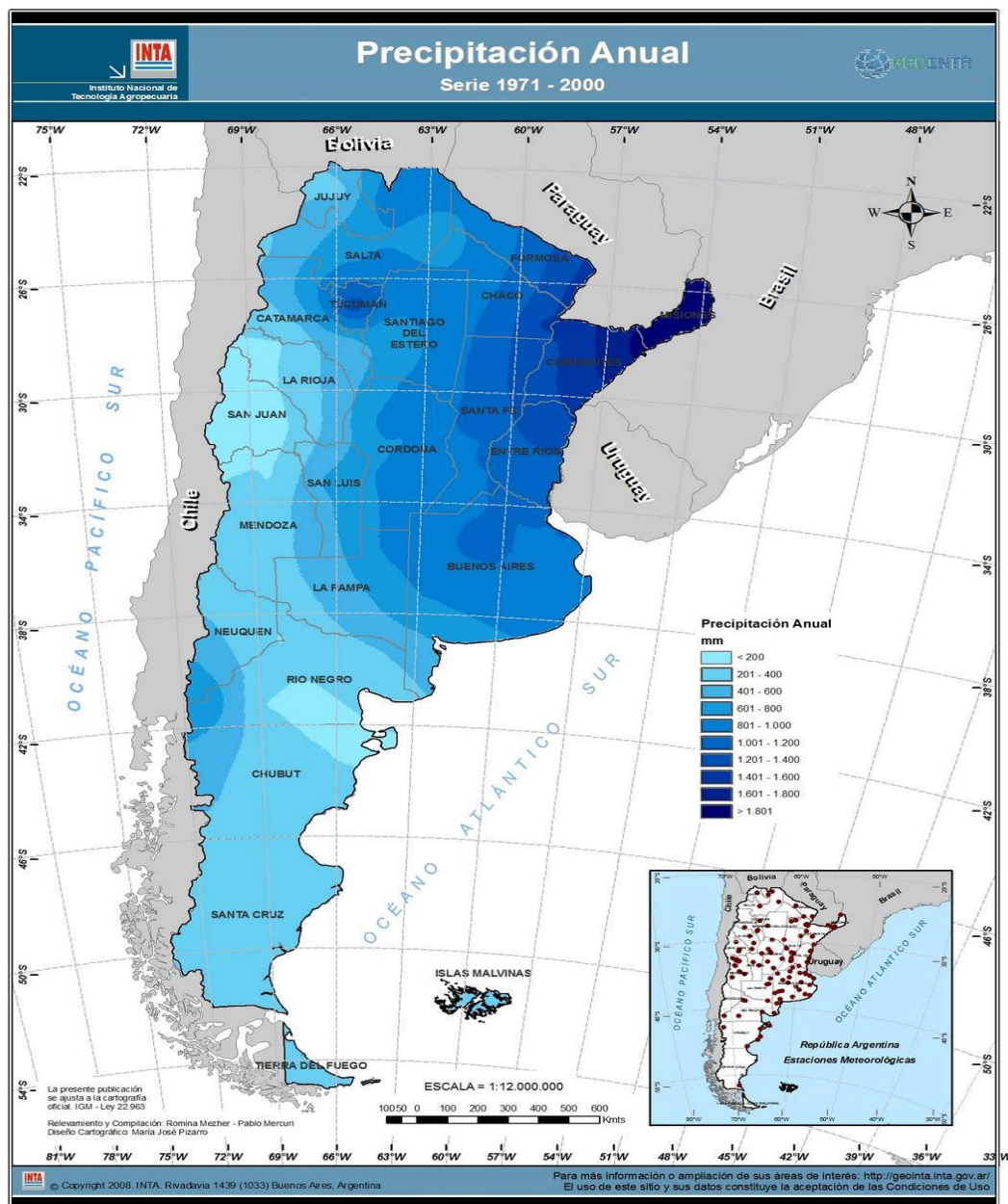


Figura 68: Lluvia media anual en la República Argentina (FUENTE: INTA)

Dicha figura no muestra la misma variable que la analizada en este trabajo (sino una que está relacionada), pero a pesar de ello se observa el mismo patrón de precipitaciones: mayores valores de oeste a este, valores altos de lámina precipitada (ya sea media anual o máximas diarias) en el límite este entre Chaco y Formosa, valores menores de lámina precipitada en el oeste de las provincias de Jujuy, Catamarca, Salta y San Luis. También se puede apreciar que en la provincia de Entre Ríos el patrón de lluvias coincide con el que se obtuvo en el presente trabajo, siendo mayor la lámina de lluvia precipitada en el noreste y menor hacia el suroeste.

8. CONCLUSIONES.

8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.

A continuación se realiza una síntesis de los resultados obtenidos con respecto a los puntos enunciados en la sección 1.3. Los resultados se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Se recopilaron y procesaron registros de 67 estaciones pluviométricas en la región de estudio (Entre Ríos).
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona sur y en la zona centro-norte de la provincia de Entre Ríos, existiendo mayor número de estaciones al este, oeste y norte de la provincia..
3. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de al menos 53 estaciones verificaron estas pruebas.
4. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verificó que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
5. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva 17.00.
6. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de importantes fluctuaciones en el espacio.
7. Se crearon mapas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.
8. Al comparar los mapas obtenidos con este trabajo con antecedentes anteriores, se obtuvieron importantes conclusiones:
 - a) Al comparar visualmente los mapas de isohietas de precipitaciones máximas diarias para un retorno de 5 años construido por Zamanillo et al (2009) y el que se realizó a partir de la interpolación de Kriging en el presente trabajo, se observa que si bien se aplicaron metodologías diferentes para su confección, los valores de lámina máxima diaria son del mismo orden de magnitud y la distribución espacial de las láminas es similar en ambos casos

- b)** Si ahora se agrupa la provincia de Entre Ríos a la base de datos nacional y se construyen los mapas de precipitaciones máximas diarias asociadas a distintas recurrencias de todas las provincias analizadas hasta la actualidad y se los compara con el mapa de isohietas de lluvia total media anual en la Republica Argentina provisto por el INTA, se puede ver que si bien que en este último mapa no se muestra la misma variable que la analizada en este trabajo (sino una que está relacionada), se observa el mismo patrón de precipitaciones: mayores valores de oeste a este, valores altos de lámina precipitada (ya sea media anual o máximas diarias) en el límite este entre Chaco y Formosa, valores menores de lámina precipitada en el oeste de las provincias de Jujuy, Catamarca, Salta y San Luis. También se puede apreciar que en la provincia de Entre Ríos el patrón de lluvias coincide con el que se obtuvo en el presente trabajo, siendo mayor la lámina de lluvia precipitada en el noreste y menor hacia el suroeste.
- c)** Finalmente se compararon cuantitativamente dos series de mapas: los realizados en Entre Ríos en este trabajo (previamente se aisló la provincia de Entre Ríos de las demás) con los logrados por Zamanillo. Entre ambas series de mapas se realiza un contraste de la variación espacial de los mismos, al realizar este cálculo pixel a pixel se obtiene un mapa que cuantifica estas diferencias porcentuales y se llega a dos importantes conclusiones:
- Las máximas diferencias relativas porcentuales se dan en el norte (y en algunos puntos locales en el interior de la provincia). En esas zonas, el mapa de la provincia de Entre Ríos generado por Zamanillo arroja un valor de lámina significativamente superior al obtenido en el presente trabajo. Además se aprecia que a medida que aumenta el tiempo de recurrencia estas zonas son mayores.
 - Las mínimas diferencias relativas porcentuales se dan para todas las recurrencias en un punto local en el centro-sur de la provincia. Esa localización es coincidente con la estación Los Pinos (código interno 15). En esa zona, el mapa generado en este trabajo arroja un valor de lámina significativamente inferior al obtenido por los mapas de Zamanillo.

8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.

Como conclusión de este trabajo, las metas que fueron planteadas al comienzo del mismo se lograron alcanzar, ya sean personales como académicas, esto fue posible gracias a un ambiente de trabajo cómodo y cálido, en donde las ganas y la paciencia de los tutores por enseñar sus conocimientos, tanto personales como técnicos, fueron muy fuertes. Y por ello me gustaría agradecerles y mostrarles mi mayor respeto. A lo largo de proceso se fueron incorporando el uso de softwares que pueden ser útiles en la vida profesional, como ser HYFRAN e IDRISI Selva 17.00, que han sido de gran utilidad para la concreción de los objetivos establecidos. No quiero olvidarme de destacar la importancia de trabajar en equipo, ya que de no haberlo hecho hubiese sido un camino duro, es otra de las cosas que se aprenden y que en la futura vida profesional va a ser de gran ayuda.

8.3. TRABAJOS FUTUROS.

Actualización de la información pluviométrica en la región de estudio, densificación de la red de estaciones disponibles e instalación de estaciones en las zonas donde hay ausencia de las mismas.

Cálculo de la lluvia máxima diaria en otras provincias del país, caso del sur argentino donde, hasta el momento de este trabajo, no se ha extendido el mapeo.

Aumentar las bases de datos de lluvias en todo el territorio nacional, ya que hasta el momento son muy escasas, siendo estas de gran importancia debido a que se pueden lograr herramientas que en la vida profesional de un ingeniero son muy importantes y necesarias.

Generación de una plataforma para acceder desde la web a la información generada.

Concientizar a las autoridades responsables de que la investigación es un motor para la creación de herramientas que pueden satisfacer las necesidades de la población actual y futura.

9. REFERENCIAS.

- Bianchiotti, Bernabé (2012). “Análisis de la Precipitación Máxima Probable a través de un Sistema de Información Geográfica”. Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.
- Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003) “Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias”. CONICET. Universitas-Editorial Científica Universitaria. Córdoba, Argentina
- Caamaño Nelli, Gabriel; García Carlos Marcelo; Dasso Clarita (1998). “Zonación de Tormentas de Diseño para la provincia de Córdoba, Argentina.” II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII CNAgua, Tomo 2, 168-178. Santa Fe, Argentina.
- Calderoni Nahuel (2014). “Regionalización de lluvias máximas diarias en las provincias de Chaco y Formosa”. Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel y Dasso, Clarita, compiladores (2011) “Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina”. 284 páginas. ISBN13: 978-3-8454-9722-8. Edit. Acad. Española (Lap Lambert Publishing GMBH & Co. KG). Saarbrücken, Deutschland.
- Chow, Ven T. (1959), Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill, 680 p.
- García, Carlos Marcelo (1994). “Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en la Provincia de Córdoba”. Trabajo Final de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Guillén, Nicolás Federico (2014). “Estudios avanzados para el diseño hidrológico e hidráulico de infraestructura hídrica” – Tesis de Maestría – Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención recursos hídricos - Centro de Estudios y Tecnología del Agua
- Idrisi Selva – Versión 17.00. Clark Labs, Clark University. 950 Main Street, Worcester MA 01610-1477 USA
- Lérica, Gastón y Sánchez, Ezequiel (2011). “Estudio Metodológico para la determinación de una Grilla i-d-T consistente a nivel Provincial”. Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.
- Maidah, Andrea Lorena (2010). “Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al estudio de Lluvias Diarias.” Tesis de Grado de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Córdoba.

- Rühle, Federico G. O. (1966). "Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas". La Ingeniería, Nº 987. Centro Argentino de Ingenieros. 2ª edición. Buenos Aires.
- Weibull, W. (1951), "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mech.-Trans. ASME 18 (3): 293-297.
- Zamanillo, Eduardo A. et al. (2009) "Procedimientos para la estimación de tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos" - 1a ed. - Buenos Aires: Univ. Tecnológica Nacional, 2009.