

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

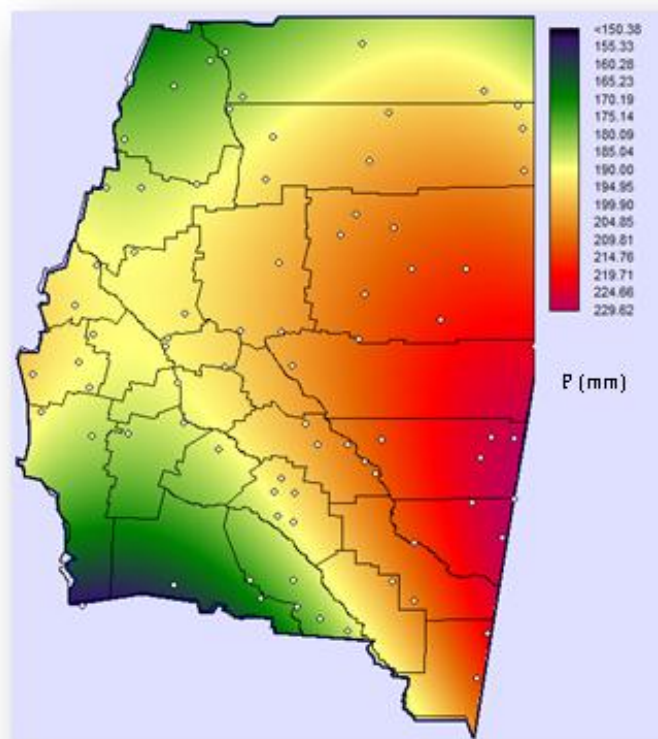
Centro de Estudios y Tecnología del Agua

PRÁCTICA SUPERVISADA

Carrera de Ingeniería Civil

“REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS

EN LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO”



Autor: AUDAGNA, Yael.

Tutor Interno: Dr. Ing. GARCÍA, Carlos Marcelo.

Supervisor Externo: Ing. GUILLÉN, Nicolás Federico.

AGRADECIMIENTOS

- A mi mamá y mi hermano, “mis empujes activo y pasivo”, que fueron mi apoyo incondicional, pilar y sostén durante estos 5 años; y al resto de mi familia, tíos y primos, por acompañarme en esta meta.
- A quien fue mi equipo de estudio; complemento incondicional e indispensable y mi amiga personal, Magalí.
- A quien me prestó un hogar cuando empecé y terminé este objetivo: Tía Julia;
- A quien fue mi familia cordobesa durante todo este tiempo, Elena;
- A mis amigos de la vida, quienes aportaron su granito de arena, todos de alguna u otra forma: Alejandra, Lili, Joaquín, Marcelo, Cynthia, Camila, Diana; y a mis amigos y compañeros facultativos: Frei, Lisandro, Ana, Laura.
- Al tutor interno, Dr. Ing. García, el “profe Marcelo”, por su contención, apoyo, disponibilidad y compromiso en este último paso.
- Al Ing. Guillén, por su colaboración, tiempo y dedicación al proyecto.
- Al Ing. Farías y al Ing. Jorge Prieto, de la provincia de Santiago del Estero, por su colaboración y predisposición a la hora de las consultas y la proporción de la información.
- A mis profesores, por la formación académica que me brindaron.
- A mi segunda casa, mi casa de estudios, la FCEFyN;
- A Dios, mi motor en esta carrera.

TÍTULO: REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO

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 Santiago del Estero. Teniendo en cuenta que para predecir esta lámina de lluvia para distintas duraciones, se necesitan registros continuos que se obtienen con *pluviografía*, y que 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. Esta información de lamina 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 cuyas series satisfacen requerimientos mínimos para su análisis. A partir de esta información se elaboraron las series históricas de máximos diarios anuales. Luego se verificaron que las series elaboradas cumplan las hipótesis estadísticas básicas requeridas para hacer un análisis de estadística inferencial (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad 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 lamina de lluvia máxima diaria para distintas probabilidades de excedencia Dichos valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron para la provincia de Santiago del Estero 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.

ÍNDICE

1. MARCO REFERENCIAL.....	19
1.1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO.....	20
1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	23
1.3.1. Objetivos Generales	23
1.3.2. Objetivos Particulares	23
1.4. METODOLOGÍA	24
2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA	29
2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	29
2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS	31
2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie	31
2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz)	32
2.2.3. Prueba de Estacionalidad (Kendall)	34
2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon)	35
2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	36
2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica	37
2.3.2. Ajuste de función de distribución de probabilidad	37
2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos	37
2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud	38
2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno	39
3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA	45
3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA	45
3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	45
3.3. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS	45
3.5. DETERMINACIÓN DEL AÑO HIDROLÓGICO PARA LA REGIÓN EN ESTUDIO.....	48
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA.....	53
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR	53
4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	57
4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS HIDROLÓGICOS .	59
4.3.1. Detección de datos atípicos	59

4.3.2. Pruebas de independencia	60
4.3.3. Prueba de Estacionaridad	61
4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual	62
4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	63
4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad	63
4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste	74
4.4.3. Contraste entre las distintas funciones de ajustes por Método de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud	75
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS.....	79
5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS	79
5.1.1. Detección de presencia de datos atípicos	79
5.1.2. Prueba de Independencia	80
5.1.3. Prueba de Estacionaridad	80
5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual	80
5.1.5. Contraste entre los valores de lluvias máximas estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log normal	81
5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	82
5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	84
6. REGIONALIZACIÓN	89
6.1. INTRODUCCIÓN.....	89
6.2. CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.....	89
6.3. CREACIÓN DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES	91
6.4. GENERACIÓN DE UNA MÁSCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACIÓN.....	95
6.5. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING	98
6.6. MÉTODO DE ANÁLISIS TENDENCIAL.....	101
6.6.1. Creación de Superficies Tendenciales	102
6.6.2. Histograma de frecuencias.....	107
6.7. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	115
7. ANÁLISIS DE MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	123

7.1. COMPARACIÓN ENTRE MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO	123
7.2. EVALUACIÓN DE LAS DIFERENCIAS OBSERVADAS ENTRE LA INFORMACIÓN REGIONALIZADA Y LA INFORMACIÓN LOCAL.....	125
8. CONCLUSIÓN	129
8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO	129
8.2. CONCLUSIONES PERSONALES	130
8.3. TRABAJOS FUTUROS.....	130
9. REFERENCIAS	133

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Mapa político de la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2: Mapa físico de la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3: Mapa Climático y de Isohietas anuales de la Provincia de Santiago del Estero</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Santiago del Estero</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 7: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación Herrera, (código interno 288), en la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 8: Salida de Estadística Base de la estación Herrera, de la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 9: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero</i>	<i>61</i>
<i>Figura 10: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionaridad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero</i>	<i>62</i>
<i>Figura 11: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero</i>	<i>63</i>
<i>Figura 12: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 13: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 14: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno $T=25$ años..</i>	<i>65</i>
<i>Figura 15: 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 Herrera.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 16: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Herrera.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 17: 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 Herrera (código interno 288).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 18: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 19: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de máxima verosimilitud.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 20: 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 la provincia de Santiago del Estero</i>	<i>81</i>

<i>Figura 21: Análisis de dispersión del método LogNormal para la provincia de Santiago del Estero</i>	82
<i>Figura 22: Estaciones finalmente seleccionadas de Santiago del Estero</i>	86
<i>Figura 23: Cuadro de diálogo Database Workshop</i>	90
<i>Figura 24: Cuadro de diálogo Database Workshop</i>	90
<i>Figura 25: Localización y valor de “z” para cada estación en Santiago del Estero</i>	91
<i>Figura 26: Cuadro de Diálogo Database Workshop – Export</i>	92
<i>Figura 27: Cuadro de Diálogo Export Vector File</i>	93
<i>Figura 28: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link</i>	93
<i>Figura 29: Cuadro de Diálogo Export Vector File</i>	94
<i>Figura 30: Localización y valores de lluvias máximas diarias para un T= 2 años</i>	94
<i>Figura 31: Cuadro de dialogo ImportDxf IDRISI</i>	95
<i>Figura 32: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module</i>	95
<i>Figura 33: Cuadro de diálogo DXF / Idrisi conversión module</i>	96
<i>Figura 34: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR</i>	96
<i>Figura 35: Cuadro de dialogo Raster / Vector conversión</i>	97
<i>Figura 36: Máscara utilizada para la provincia de Santiago del Estero</i>	97
<i>Figura 37: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation</i>	99
<i>Figura 38: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation</i>	100
<i>Figura 39: Raster interpolado por el método Kriging para PMD2 (Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años)</i>	100
<i>Figura 40: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend</i>	102
<i>Figura 41: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend</i>	103
<i>Figura 42: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años</i>	103
<i>Figura 43: Archivo de salida del módulo “Trend”</i>	104
<i>Figura 44: Secuencia para abrir la función “Overlay”</i>	105
<i>Figura 45: Cuadro de diálogo de la función Overlay</i>	105
<i>Figura 46: Esquema de la operación Overlay</i>	106
<i>Figura 47: Grilla interpolado por el método Trend. T = 2 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales</i>	106
<i>Figura 48: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan dentro del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)</i>	107
<i>Figura 49: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)</i>	108
<i>Figura 50: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)</i>	108
<i>Figura 51: Cuadro de dialogo de la función Overlay</i>	108
<i>Figura 52: Diferencia entre “Kriging” (valores mínimos) y “Trend” (regresión lineal). T = 2 Años</i>	109
<i>Figura 53: Secuencia para abrir la función Histo</i>	110
<i>Figura 54: Cuadro de diálogo de la función Histo</i>	111
<i>Figura 55: Histograma de frecuencias. Producción numérica</i>	111

<i>Figura 56: Histograma de frecuencias min-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 57: Histograma de frecuencias max-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 58: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos</i>	<i>115</i>
<i>Figura 59: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 2 años [en mm]</i>	<i>116</i>
<i>Figura 60: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 5 años [en mm]</i>	<i>116</i>
<i>Figura 63: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 25 años [en mm]</i>	<i>118</i>
<i>Figura 64: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 50 años [en mm]</i>	<i>118</i>
<i>Figura 65: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 100 años [en mm]</i>	<i>119</i>
<i>Figura 65: Mapa de isohietas anuales de la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>124</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Valores K_n para la prueba de datos atípicos.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2: Valores de K_{cri} para el test de Kendall</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3: Periodos de retorno en años, usados para el diseño de estructuras de control (Chow)...</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5: Estaciones pluviométricas seleccionadas (longitud de registro mayor a 14 años)</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6: Estaciones pluviométricas seleccionadas (longitud de registro mayor a 14 años)</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7: Precipitaciones diarias de la estación Brea Pozo y selección de la máxima lluvia diaria</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 8: Planilla de Máximos Anuales, de la estación Brea Pozo, en la provincia de Santiago del Estero, en donde se destaca la máxima lluvia diaria del año 2000, extraída de la Tabla 7</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 9: Datos generales de la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10: Valores de PMDA de la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 11: Valores de PMDA y datos estadísticos calculados de la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 12: Probabilidad empírica de no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación Herrera, de la provincia de Santiago del Estero (código interno 288).....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 13: Planilla resumen de datos pluviométricos.....</i>	<i>60</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 GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 28 años de la.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 15: 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 momentos) sobre los registros de 28 años de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 16: 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.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 17: 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 28.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 18: Estimación de laminas 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 28.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 19: Estimación de laminas 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.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 20: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 21: 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>75</i>
<i>Tabla 22: Estaciones pluviométricas con más de dos Datos Atípicos</i>	<i>79</i>

<i>Tabla 23: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 24: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionaridad</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 25: Parte de los datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales registradas en las estaciones finalmente seleccionadas</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 26: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Santiago del Estero.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 27: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Santiago del Estero.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 28: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 2 Años</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 29: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 5 Años</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 30: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 10 Años</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 31: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 20 Años</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 32: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 25 Años</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 33: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 50 Años</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 34: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 100 Años.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 35: Comparación entre los valores locales de láminas de lluvia diaria y la superficie tendencial, para T=2 años.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 36: Comparación entre los valores de la distribución Log normal y la superficie tendencial, para T=100 años</i>	<i>125</i>

Capítulo 1

MARCO REFERENCIAL

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 generado 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.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO

Santiago del Estero es una provincia de Argentina situada en la región Noroeste de la Argentina. Limita con la Provincia de Salta al noroeste, al norte y noreste con la Provincia del Chaco, al sudeste con Provincia de Santa Fe, al sur con Córdoba y al oeste con Catamarca y Tucumán.

La provincia cuenta con una población de 896.461 habitantes, distribuida en una superficie de 136.351 km². Políticamente está dividida en 27 Departamentos, los cuales se pueden ver en la Figura 1 y con los que se interactúa durante todo el desarrollo del presente trabajo.

En cuanto al **relieve** (ver Figura 2), se encuentra incluida casi totalmente en la llanura chaqueña. La mayor parte presenta relieve muy llano con algunas áreas deprimidas. Una pequeña parte de su territorio, al sur y al oeste, forma parte de las Sierras Pampeanas con pequeñas lomadas. Más al suroeste, en los límites con Córdoba y Catamarca se encuentra una cuenca endorreica caracterizada por su aridez y la existencia de enormes salares como los del conjunto Salinas Grandes y Salinas de Ambargasta, mientras que al sudeste se encuentran áreas más bajas, con humedales que desembocan en la gran Laguna de Mar Chiquita y las lagunas asociadas a los cráteres meteoríticos del Campo del Cielo, mientras que al noreste de la provincia corresponden zonas de Chaco Impenetrable.

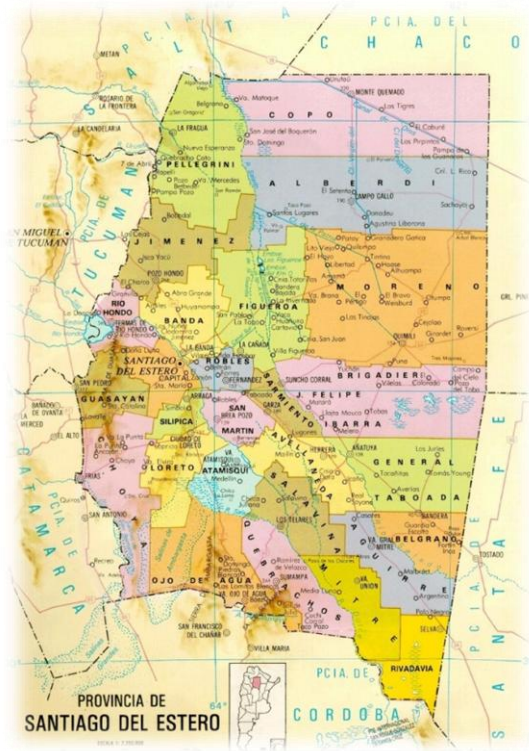


Figura 1: Mapa político de la provincia de Santiago del Estero



Figura 2: Mapa físico de la provincia de Santiago del Estero

En lo que respecta al **clima**, toda la provincia de Santiago del Estero posee clima semitropical continental con estación seca, que se caracteriza por tener temperaturas bastante extremas y precipitaciones de abundantes a suficientes concentradas en verano. Una característica peculiar es la presencia de algunos días con temperaturas anormales para la estación, por ejemplo máximas de 40 °C en pleno invierno, o temperaturas que no pasan de 30 °C en el verano. También puede decirse que la provincia es de extremos, con marcas cercanas a los 50 °C en el norte y -3 °C en el sur. Además debido a la lejanía con el mar se acentúa la continentalidad, lo que resulta en baja humedad ambiental y diferencias entre el día y la noche (que pueden superar fácilmente los 20 °C). La provincia se ve afectada regularmente por sequías, ya que en general las precipitaciones son escasas y prácticamente limitadas solo al verano. A continuación, en la Figura 3 se puede apreciar la distribución climática en toda la provincia y las líneas de isohietas anuales.

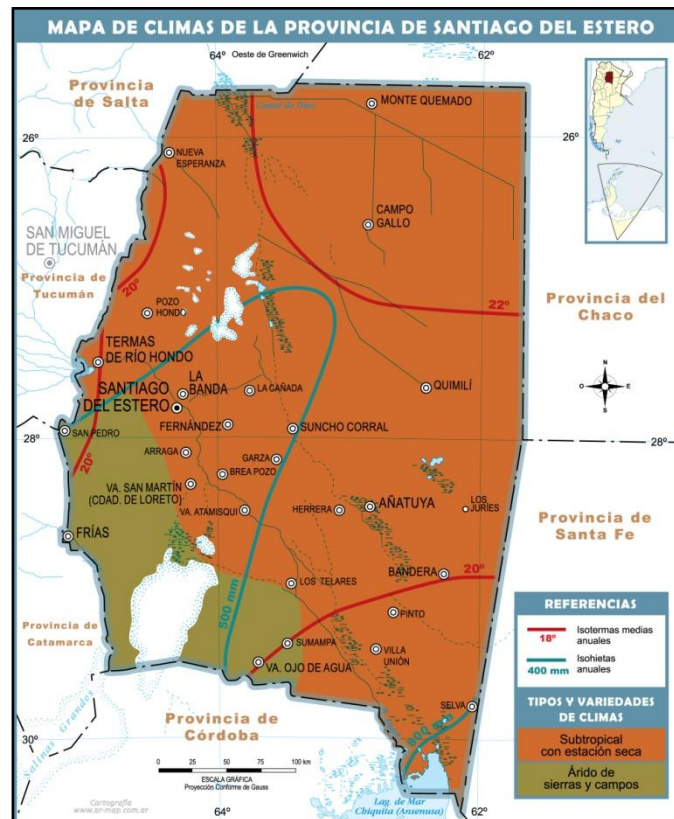


Figura 3: Mapa Climático y de Isohietas anuales de la Provincia de Santiago del Estero

Las isohietas anuales promedio van de 750 – 800 mm a 500mm. El periodo estival es el de mayor significación con una máxima que varía entre 500 y 540 mm y una mínima de 300 mm, que producen una media de alrededor de 380 mm, con 30 días de lluvia

aproximadamente, y un valor próximo al 80% del total. La estación seca, época crítica por la carencia de humedad debido a la escasez de lluvias, se extiende de junio a octubre con una máxima pluviométrica de 120 mm y una mínima de alrededor de 55mm, con lo que se logra una media de 78 mm y 3,5 días de lluvia en el periodo. Es decir, se tiene una estación lluviosa que va a estar acompañada de altas temperaturas y una estación seca, con temperaturas moderadas. Si ahora realizamos un balance hidráulico, no se produce almacenaje de agua en el suelo en ninguna época del año.

1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

1.3.1. Objetivos Generales

- Regionalizar la lluvia máxima diaria en la provincia de Santiago del Estero.

1.3.2. Objetivos Particulares

Para cumplir 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 Santiago del Estero.
- Participar en la recopilación, depuración y análisis preliminar de información pluviométrica, según los tres casos determinados mediante el uso de diferentes relenos
- 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).

- Análisis de mapas tendenciales de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno con el fin de evaluar tendencias y diferencias con valores estimados localmente.

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 Santiago del Estero.
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, estacionalidad 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. Construcción de mapas digitales a partir de series históricas de máximos diarios.

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 y VIII.

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

Capítulo 2

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA

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 en 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 2-12

$E(X)$ 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 2-13

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 2-14

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 2-15

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 2-16

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 2-17

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, describe las características generales de la población a la que pertenece, y que a la misma se le puede aplicar la estadística inferencial.

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 y y es el desvío estándar s_y . La siguiente ecuación (aplicando la metodología propuesta por Chow -1959) de frecuencia puede utilizarse para detectar datos atípicos:

$$Y = y \pm K_n * s_y$$

Ecuación 2-1

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 (Ver 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	Kn	Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn
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 Kn 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:

H_0 : El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.

H_1 : 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;

n_1 : Número de éxitos, o de valores superiores a la media;

n_2 : 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 2-2

Dónde:

$$\mu_r = \frac{2 * n_1 * n_2}{n} + 1$$

Ecuación 2-3

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{(\mu_r - 1) * (\mu_r - 2)}{n - 1}}$$

Ecuación 2-4

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

2.2.3. Prueba de Estacionalidad (Kendall)

Mediante la prueba estadística de estacionalidad 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 2-5

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). Los mismos se determinan de la siguiente manera:

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

Ecuación 2-6

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:

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

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

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

Ecuación 2-7

Los valores de K_{cri} son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 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 2-8

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 2-9

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

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

Ecuación 2-10

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 2-11

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 toda 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 desarrollan:

- 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 2-18

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 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 $x = 0$, entonces el primer momento de cada observación x_i alrededor del origen es el producto de su brazo de momento x_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 2-21

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

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

Ecuación 2-22

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 requiriera.

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 ó 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 $X = x_i$ es $f(x_i)$, y la probabilidad de que la variable aleatoria ocurra en el intervalo que incluye x_i es $f(x_i) dx$. 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; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 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 2-23

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 2-24

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 2-25

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 2-26

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 $P(n_p, n_d, n_o)$ de que en n_p años de predicción futuros se alcance o se supere la magnitud del evento crítico, de duración n_d años, medido en n_o 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 2-27

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 2-28

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, usados para el diseño de estructuras de control (Chow)

Capítulo 3

INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA

3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA

3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA

Las series de máximos anuales para cada una de las estaciones analizadas, fueron proporcionadas por el *Instituto de Recursos Hídricos, Fac. de Cs. Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero*. Se partió de un total de 91 estaciones pluviométricas dentro del territorio.

3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

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. Como este condicionante, implicaría rechazar puestos pluviométricos disponibles, se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años. En la Tabla 4 se observan las frecuencias de las estaciones en función de la longitud de la serie.

Longitud de serie		
Estaciones con datos	91	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	4	4.40%
Longitud de serie \geq 14	87	95.60%
Longitud de serie \geq 20	68	74.72%

Tabla 4: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie

3.3. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS

En las Tabla 5 y 6 se describen las estaciones seleccionadas en primera instancia y en la Figura 4 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas. La tabla muestra las estaciones correspondientes a las series sin relleno.

Código	Código Interno	Nombre de la Estación	Longitud	Latitud
1	285	El Oso	-62.521	-29.549
2	286	Pinto	-62.522	-29.158
3	287	Colonia Dora	-62.856	-28.616
4	288	Herrera	-62.967	-28.503
5	289	Icaño	-62.782	-28.696
6	290	Lugones	-63.252	-28.368
7	291	Toropan	-63.591	-28.539
8	292	Villa Mailin	-63.171	-28.505
9	293	Campo Gallo	-62.821	-26.615
10	294	El Porvenir	-62.691	-26.289
11	295	Huachana	-63.465	-26.454
12	296	Monte Rico	-61.798	-26.397
13	297	Santos Lugares	-63.513	-26.739
14	298	Sachajoy	-61.785	-26.679
15	300	Villa Atamisqui	-63.828	-28.538
16	301	La Banda	-64.164	-27.794
17	302	Clodomira	-64.057	-27.630
18	303	Bandera	-62.133	-28.892
19	304	Cuatro Bocas	-61.759	-28.851
20	305	Fortin Inca	-61.819	-29.104
21	306	Santiago del Estero	-64.186	-27.848
22	307	Los Pirpintos	-62.050	-26.147
23	308	Monte Quemado	-62.867	-25.829
24	309	Pampa de los Guanacos	-61.830	-26.241
25	310	San Jose de Boqueron	-63.665	-26.189
26	311	Urutau	-63.025	-25.761
27	312	Villa Matoque	-63.779	-25.888
28	313	Frias	-65.044	-28.716
29	314	Laprida	-64.431	-28.432
30	315	La Vuelta	-64.741	-29.579
31	316	Villa la Punta	-64.679	-28.449
32	317	Bandera Bajada	-63.422	-27.297
33	318	La Cañada	-63.687	-27.749
34	319	Villa Figueroa	-63.406	-27.752
35	320	Doña Luisa	-64.669	-27.769
36	321	Guampacha	-64.692	-28.128
37	322	Lavalle	-65.011	-28.287
38	323	San Pedro	-65.068	-28.039
39	324	Santa Catalina	-64.682	-28.213
40	325	Villa Guasayan	-64.762	-27.956
41	326	El Arenal	-64.581	-26.789
42	327	El Bobadal	-64.348	-26.791
43	328	El Charco	-64.642	-27.311
44	329	Pozo Hondo	-64.397	-27.220

Tabla 5: Estaciones pluviométricas seleccionadas (longitud de registro mayor a 14 años)

Código	Código Interno	Nombre de la Estación	Longitud	Latitud
45	330	Suncho Corral	-63.333	-27.978
46	331	Yuchan	-62.892	-27.802
47	332	Campo del Cielo	-61.716	-27.850
48	333	Loreto	-64.065	-28.358
49	334	Las Tinajas	-62.854	-27.501
50	335	Libertad	-63.015	-27.105
51	336	Lilo Viejo	-62.907	-26.971
52	337	Otumpa	-62.173	-27.330
53	338	Quimili	-62.348	-27.671
54	340	Tintina	-62.657	-27.062
55	341	Weisburd	-62.541	-27.332
56	342	Km. 49	-63.617	-29.411
57	343	La Isla	-64.131	-29.439
58	344	Ojo de Agua	-63.548	-29.529
59	345	Sol de Julio	-63.305	-29.587
60	346	Villa Union	-62.665	-29.419
61	347	Agua Amarga	-64.701	-25.929
62	348	Ahí Veremos	-63.882	-25.947
63	349	La Fragua	-64.307	-26.117
64	350	Las Delicias	-63.974	-26.767
65	352	Rapelli	-64.461	-26.469
66	353	Santo Domingo-	-63.753	-26.270
67	354	San Francisco	-63.171	-29.439
68	355	Sumampa	-63.330	-29.410
69	356	Taco Pozo	-62.901	-29.756
70	357	Colonia Alpina	-61.893	-29.974
71	358	Palo Negro	-61.996	-29.658
72	359	Termas	-61.908	-29.743
73	360	Selva	-64.789	-27.577
74	361	Fernandez	-63.786	-27.988
75	362	Barrancas	-63.412	-28.733
76	363	Chilca Juliana	-63.454	-28.823
77	364	Los Telares	-63.331	-29.023
78	365	Rubia Paso	-63.431	-28.979
79	366	Varas Cuchuna	-63.151	-29.669
80	367	Villa Salavina	-63.319	-28.825
81	368	Brea Pozo	-63.844	-28.285
82	369	Garza	-63.402	-28.188
83	370	Arraga	-64.106	-28.094
84	371	Añatuya	-62.739	-28.473
85	372	La Nena	-61.756	-28.452
86	373	Los Juries	-62.004	-28.456
87	374	Tomas Young	-62.076	-28.597

Tabla 6: Estaciones pluviométricas seleccionadas (longitud de registro mayor a 14 años)

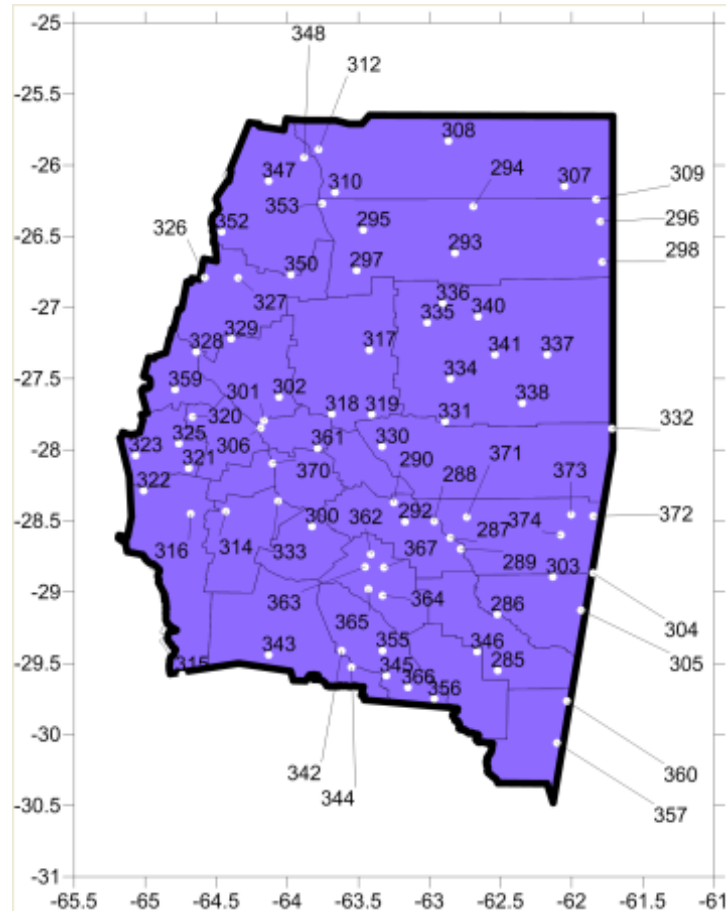


Figura 4: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Santiago del Estero

3.5. DETERMINACIÓN DEL AÑO HIDROLÓGICO PARA LA REGIÓN EN ESTUDIO

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en “años hidrológicos”. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario.

Entonces, para cada una de las estaciones analizadas (sin relleno en este caso), y cada uno de los años analizados, se dispone de las lluvias diarias.

Estas fueron filtradas para la obtención del valor de máxima lluvia diaria del año.

Por último, ese valor obtenido fue el incorporado a la planilla de máximos anuales.

A continuación y a través de un ejemplo, en las Tablas 7 y 8, se logra apreciar el proceso.

ADMINISTRACION PROV. DE REC. HIDRICOS
 Departamento de Estudios Hidrometeorológicos
 Santiago del Estero

Coordenadas Geográficas:

Latitud: N 28° 14'
 Longitud: O 63° 57'

Localidad: Brea Pozo
 Departamento: San Martín
 Año: 2000

Días	PRECIPITACION DIARIA EN MILIMETROS																															Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Enero	0	0	0	0	0	15	0	0	25	4	0	0	16	0	0	0	0	25	0	0	0	7	0	50	70	0	0	6	0	0	0	218
Febrero	0	0	11	0	0	0	0	31	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	7	12	0	22	10	0	0	119	
Marzo	0	0	0	0	5	0	0	30	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	
Abril	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	
Mayo	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	7	0	0	3	0	0	0	0	15	
Noviembre	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	4	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	3	0	39	
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	
																																481

70

Tabla 7: Precipitaciones diarias de la estación Brea Pozo y selección de la máxima lluvia diaria

AÑO	Brea Pozo
1974	190
1975	190
1978	80
1979	105
1980	84
1982	92
1983	68
1984	150
1985	65
1986	75
1987	75
1988	53
1989	156
1990	90
1991	70
1992	93.07
1993	35
1994	85
1995	24
1996	60
1997	58
1998	43
1999	50
2000	70
2001	60
2002	48
2003	44
2006	116

Tabla 8: Planilla de Máximos Anuales, de la estación Brea Pozo, en la provincia de Santiago del Estero, en donde se destaca la máxima lluvia diaria del año 2000, extraída de la Tabla 7

Capítulo 4

ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA

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

En el presente capítulo, se realiza el análisis estadístico completo descrito en el capítulo II, para una estación.

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 Herrera (código interno 288) localizada en la provincia de Santiago del Estero. Se elige esta serie por ser la más larga en cuanto a la longitud de registro de datos que se ha utilizado en el análisis. En forma similar se analizaron el resto de las estaciones seleccionadas.

- Para el análisis de estos 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, en 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, coordenadas, ubicación y código interno asignado a la estación.

En la Tabla 9 se tienen los datos generales de la estación y en la Tabla 10 se pueden apreciar de los valores de las PMA (Precipitaciones Máximas Anuales), que corresponden a la estación; vale aclarar que esta es la forma en que se proporcionaron los datos.

En la Tabla 11 se observan los valores de máxima lluvia anual y en las últimas filas los datos estadísticos calculados, como son Máximo, Mínimo, Promedio, Desvío Estándar y Coeficiente de Asimetría.

Estacion:	Herrera - Avellaneda	
Coordenadas:	-62.96	-28.502
Provincia:	Santiago del Estero	
Codigo interno:	288	
Año Inicio	1974	

Tabla 9: Datos generales de la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero

En la Figura 5 se representa la evolución temporal de los máximos valores anuales de lluvia diaria en función del año en que se registró el evento para la estación Herrera. Los registros de la estación cuentan con 28 años de longitud, siendo el más extenso de todas las series registradas.

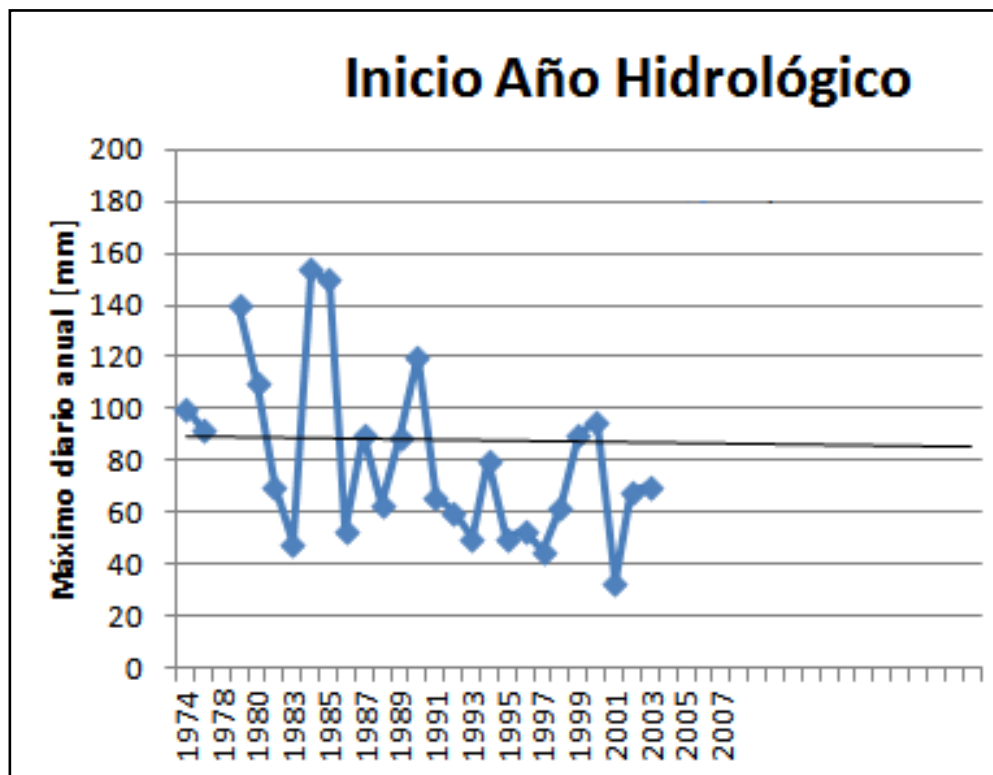


Figura 5: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero

Maximo	Año
100	1974
92	1975
S/D	1978
140	1979
110	1980
70	1982
48	1983
154	1984
150	1985
53	1986
90	1987
63	1988
89	1989
120	1990
66	1991
60	1992
50	1993
80	1994
50	1995
53	1996
45	1997
62	1998
90	1999
95	2000
33	2001
68	2002
70	2003
S/D	2004
185	2005
184	2006
S/D	2007
S/D	2008

**Tabla 10: Valores de PMDA de la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero
S/D: “Sin Datos”, es decir, que en ese año hidrológico faltaron datos**

Maximo	Año
100	1974
92	1975
S/D	1978
140	1979
110	1980
70	1982
48	1983
154	1984
150	1985
53	1986
90	1987
63	1988
89	1989
120	1990
66	1991
60	1992
50	1993
80	1994
50	1995
53	1996
45	1997
62	1998
90	1999
95	2000
33	2001
68	2002
70	2003
S/D	2004
185	2005
184	2006
S/D	2007
S/D	2008
Maximo	185
Minimo	33
Promedio	88.214
Desv. Est.	41.610
Coef. Asim.	1.045

Tabla 11: Valores de PMDA y datos estadísticos calculados de la estación Herrera, en la provincia de Santiago del Estero

4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

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

- La pestaña “Descripción” (Ver Figura 6) se coloca el número y nombre de la estación como “Titulo del Proyecto”; se borran los comentarios, se coloca “P” en el nombre de la variable, “mm” en unidad y “5” en números significativos. En formula de probabilidad empírica se selecciona 0.0, correspondiente a la Formula de Weibull.
- 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 construida en Excel, siendo esta, “Hyfran Muestra” (Figura 7 y Tabla 12). En la Tabla 12 se pueden observar de manera completa los datos con las probabilidades empíricas de no excedencia, no así en la Figura 7.
- 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 (Ver Figura 8).

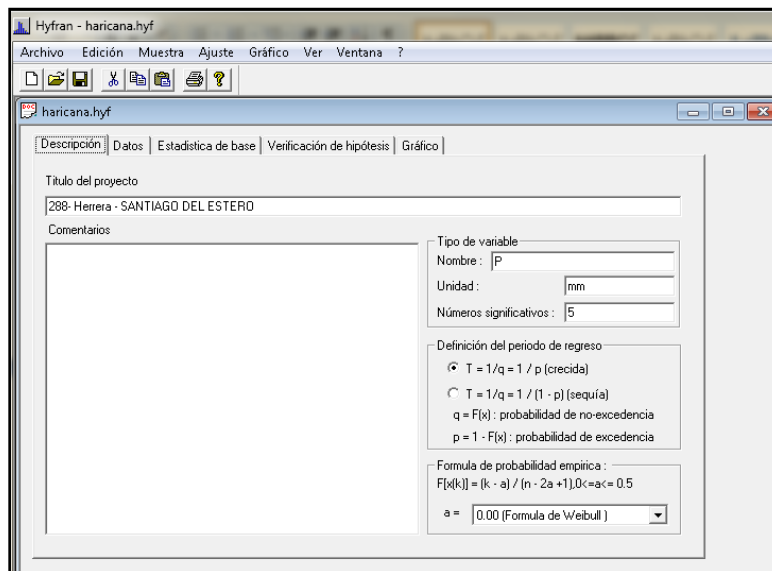


Figura 6: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación

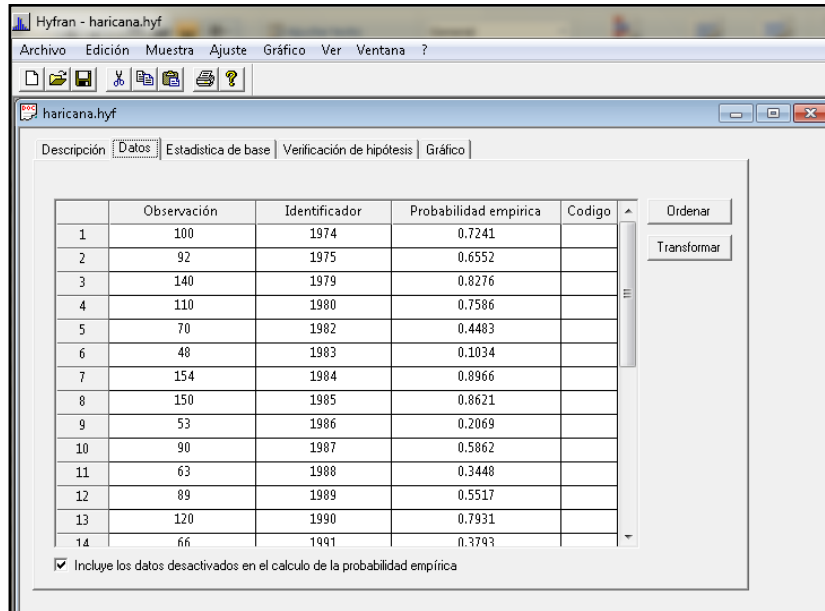


Figura 7: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación Herrera, (código interno 288), en la provincia de Santiago del Estero

Observación	Identificador	Probabilidad Empírica
100	1974	0.7241
92	1975	0.6552
140	1979	0.8276
110	1980	0.7586
70	1982	0.4483
48	1983	0.1034
154	1984	0.8966
150	1985	0.8621
53	1986	0.2069
90	1987	0.5862
63	1988	0.3448
89	1989	0.5517
120	1990	0.7931
66	1991	0.3793
60	1992	0.2759
50	1993	0.1379
80	1994	0.5172
50	1995	0.1724
53	1996	0.2414
45	1997	0.069
62	1998	0.3103
90	1999	0.6207
95	2000	0.6897
33	2001	0.0345
68	2002	0.4138
70	2003	0.4828
185	2005	0.9655
184	2006	0.931

Tabla 12: Probabilidad empírica de no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación Herrera, de la provincia de Santiago del Estero (código interno 288)

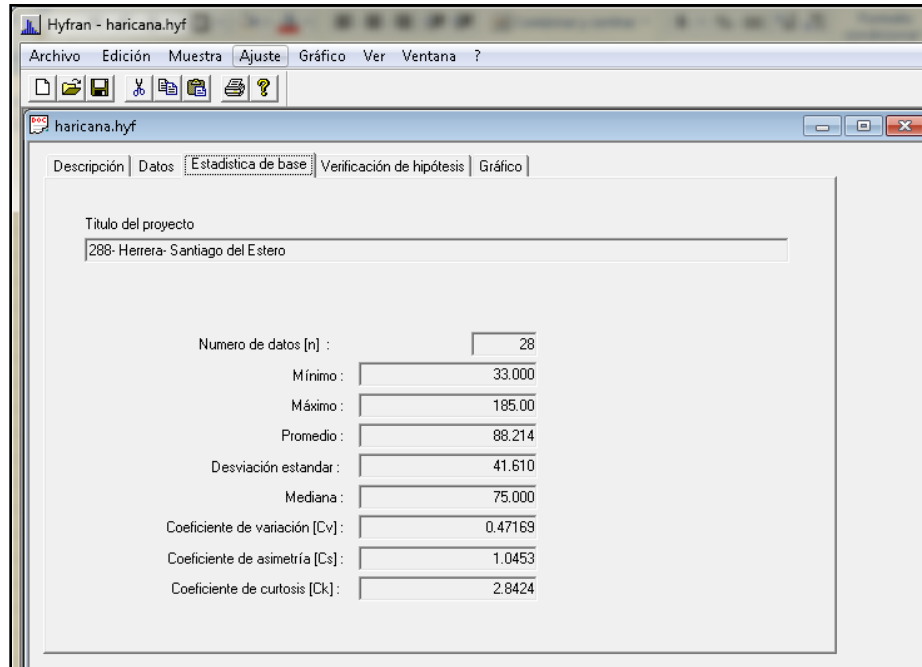


Figura 8: Salida de Estadística Base de la estación Herrera, de la provincia de Santiago del Estero

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 2.1.1. En la Tabla 13 se observa el test realizado implementando el uso de las herramientas de Excel en la serie de la estación pluviométrica Herrera. En este caso no se detectó ningún dato atípico, por lo cual en todos los datos aparece la palabra “VERIFICA” en la quinta columna.

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.

n	Prec. Max diaria anual	Año	LnMax		Completa	Trunca
					(x-media)^2	(x-media)^2
1	100	1974	4.605	VERIFICA	235.11	368.34
2	92	1975	4.522	VERIFICA	53.78	125.27
3	140	1979	4.942	VERIFICA	3061.78	3503.73
4	110	1980	4.700	VERIFICA	641.78	852.19
5	70	1982	4.248	VERIFICA	215.11	116.81
6	48	1983	3.871	VERIFICA	1344.44	1076.34
7	154	1984	5.037	VERIFICA	4807.11	5357.11
8	150	1985	5.011	VERIFICA	4268.44	4787.58
9	53	1986	3.970	VERIFICA	1002.78	773.27
10	90	1987	4.500	VERIFICA	28.44	84.50
11	63	1988	4.143	VERIFICA	469.44	317.11
12	89	1989	4.489	VERIFICA	18.78	67.11
13	120	1990	4.787	VERIFICA	1248.44	1536.04
14	66	1991	4.190	VERIFICA	348.44	219.27
15	60	1992	4.094	VERIFICA	608.44	432.96
16	50	1993	3.912	VERIFICA	1201.78	949.11
17	80	1994	4.382	VERIFICA	21.78	0.65
18	50	1995	3.912	VERIFICA	1201.78	949.11
19	53	1996	3.970	VERIFICA	1002.78	773.27
20	45	1997	3.807	VERIFICA	1573.44	1282.19
21	62	1998	4.127	VERIFICA	513.78	353.73
22	90	1999	4.500	VERIFICA	28.44	84.50
23	95	2000	4.554	VERIFICA	106.78	201.42
24	33	2001	3.497	VERIFICA	2669.44	2285.58
25	68	2002	4.220	VERIFICA	277.78	164.04
26	70	2003	4.248	VERIFICA	215.11	116.81
27	185	2005	5.220	VERIFICA	10066.78	10856.04
Promedio	84.67	Media Ln	4.350		37232.00	37634.08
Desvío est.	37.84	Desvió Ln	0.424		38.59	38.05
		K	2.534			
		Yh	5.4251	romedio n-1 =		80.81
		Yl	3.2755	esvío est. n-1 =		32.73

Tabla 13: Planilla resumen de datos pluviométricos

4.3.2. Pruebas 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 9 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión.

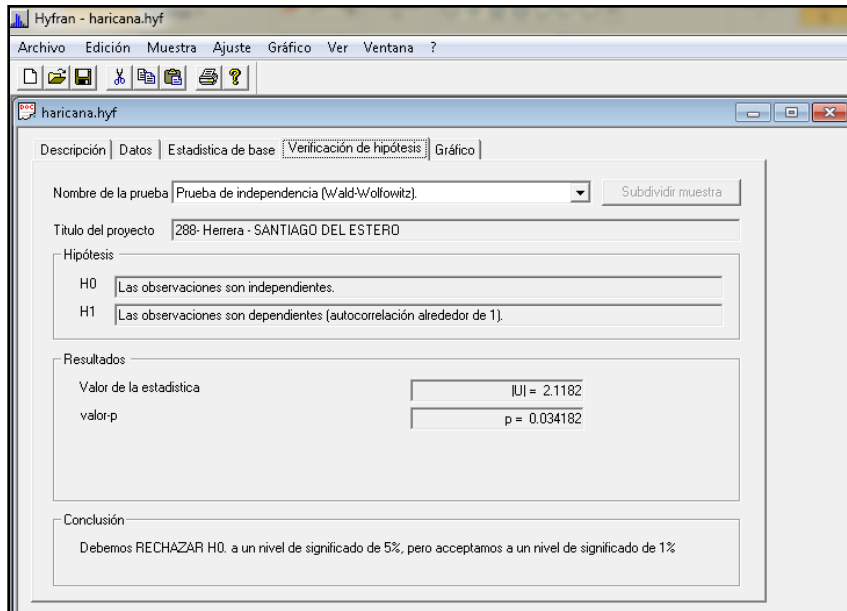


Figura 9: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

Se puede observar que verifica la prueba de Independencia con un nivel de significancia del 3%. 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 Estacionaridad

La prueba de estacionaridad de Kendall (detallada en la sección 2.1.3) permite verificar si existe una tendencia importante en la serie. En la Figura 10 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión. Se puede observar que verifica la prueba de Estacionaridad con un nivel de significancia del 35%.

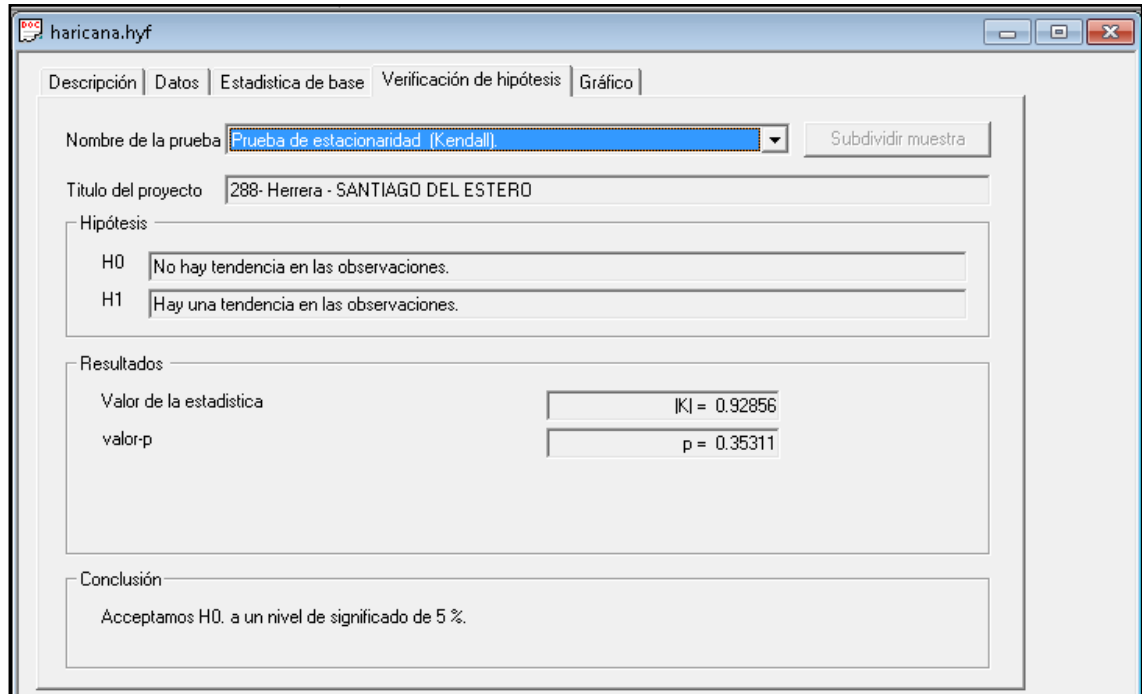


Figura 10: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionaridad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual

La prueba de homogeneidad del promedio a escala anual de Wilcoxon (detallada en la sección 2.1.4.) 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 1985 a partir del análisis de la Figura 5.

El primer subgrupo se compone de las observaciones que comienzan con el primer año y terminan con un año de corte, el segundo subgrupo está integrado a partir del año siguiente al año de corte hasta las observaciones finales. Para ejecutar esta prueba, para cada observación se debe especificar el año de corte; en la Figura 11 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 6% aproximadamente.

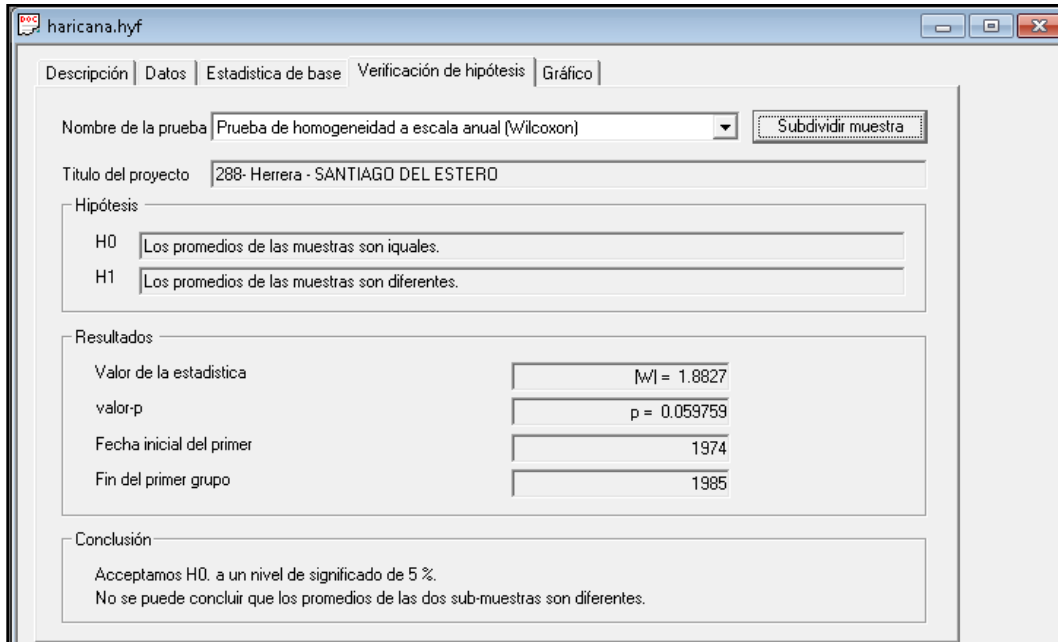


Figura 11: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

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. (Detallado 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:

- a) GEV (Método de Max. Verosimilitud).
- b) Gumbel (Método de Max. Verosimilitud).
- c) LogNormal (Método de Max. Verosimilitud).
- d) GEV(Método de Momentos).
- e) Gumbel (Método de Momentos).
- f) 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 para homogeneizar una misma función de distribución de probabilidad para representar las

muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales; se optó por la función Log normal, que coincide con la 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 12 y Figura 13 se demuestra el procedimiento descripto.

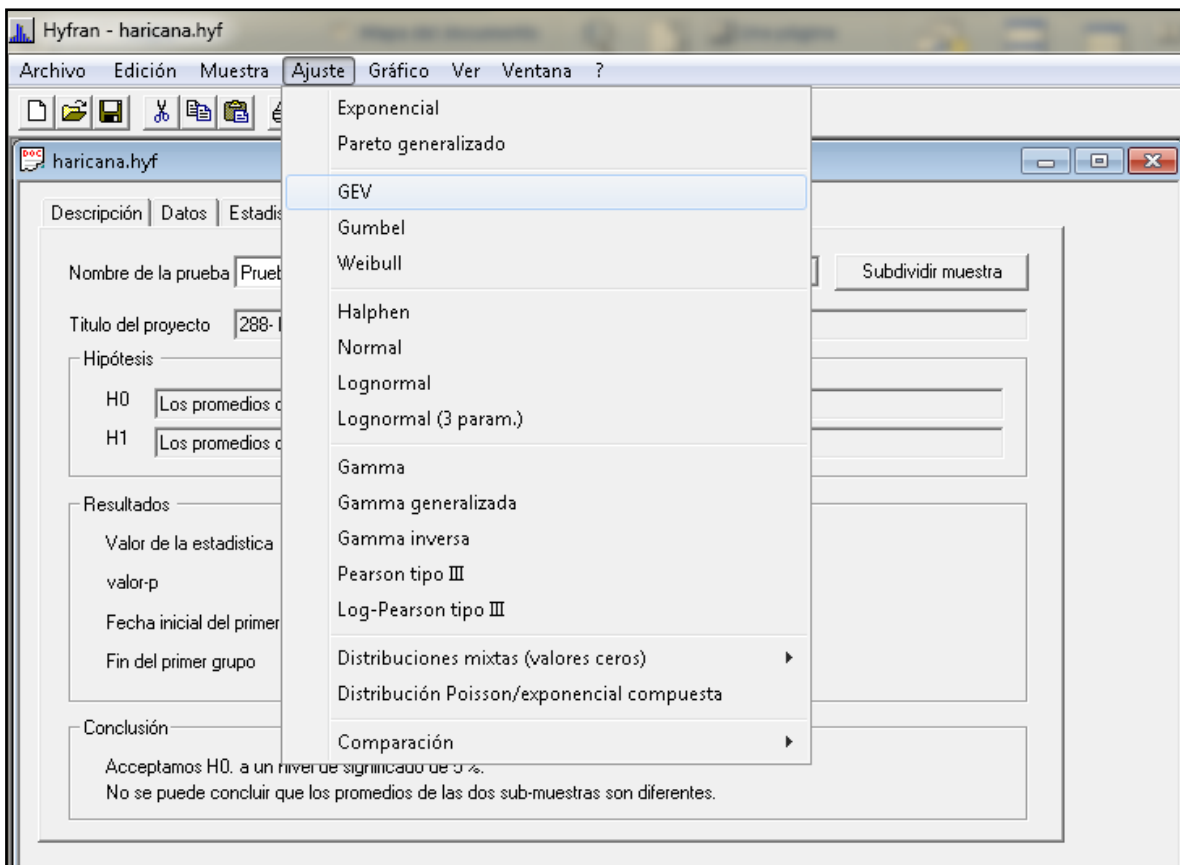


Figura 12: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad

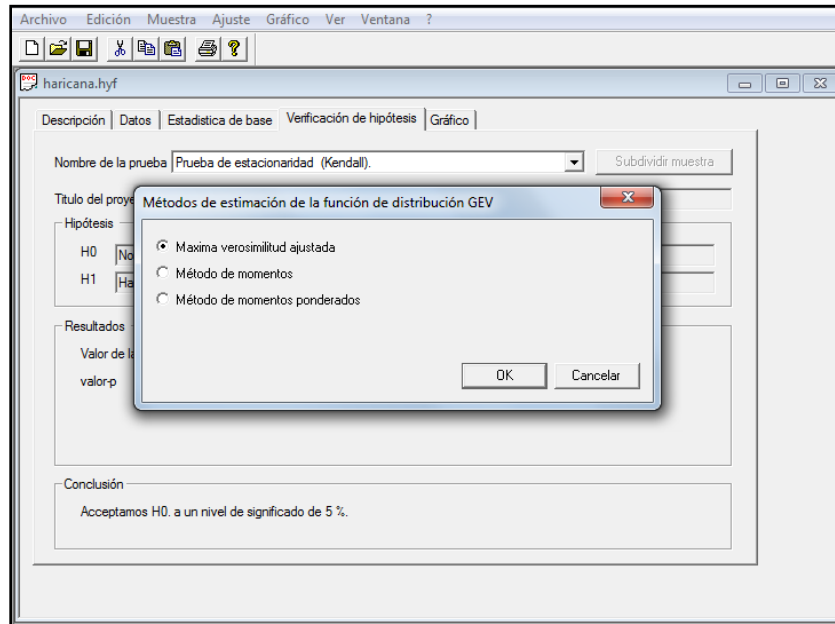


Figura 13: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad

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 asignó manualmente el periodo de retorno de veinticinco años. Esto se llevaba a cabo seleccionando la pestaña “Otro periodo de regreso” y tipeando el valor a asignar (Figura 14).

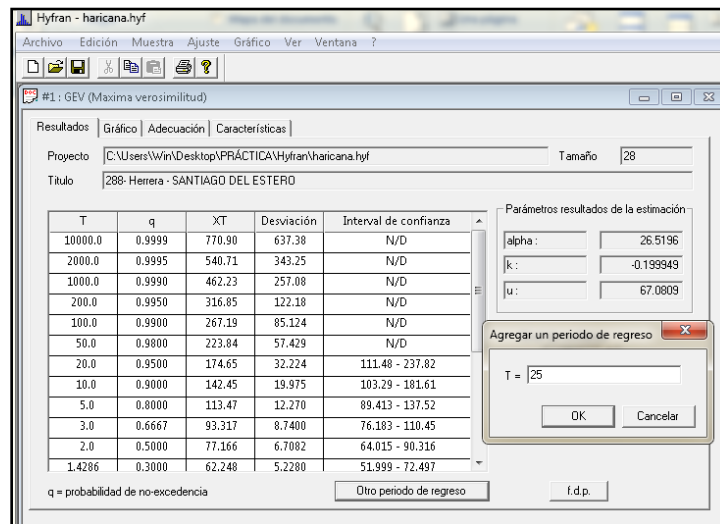


Figura 14: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años

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 15 y Figura 16).

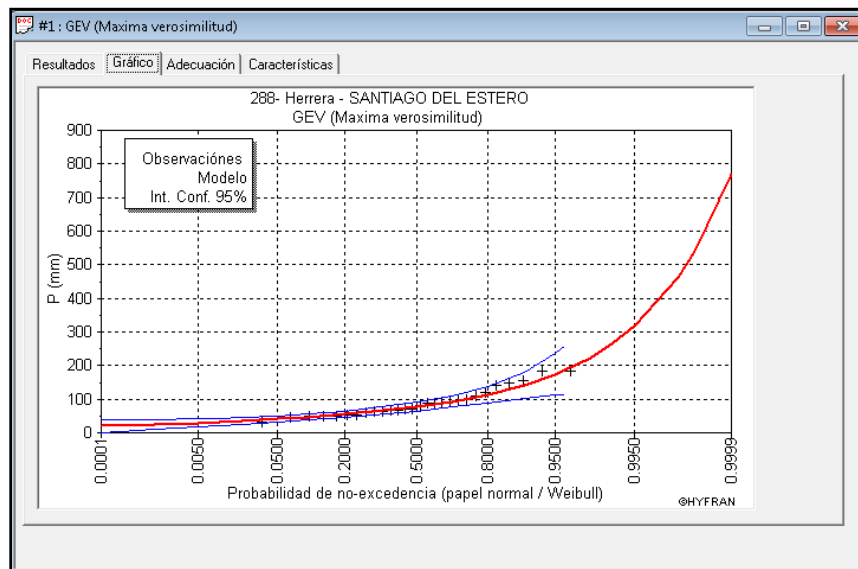


Figura 15: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Herrera

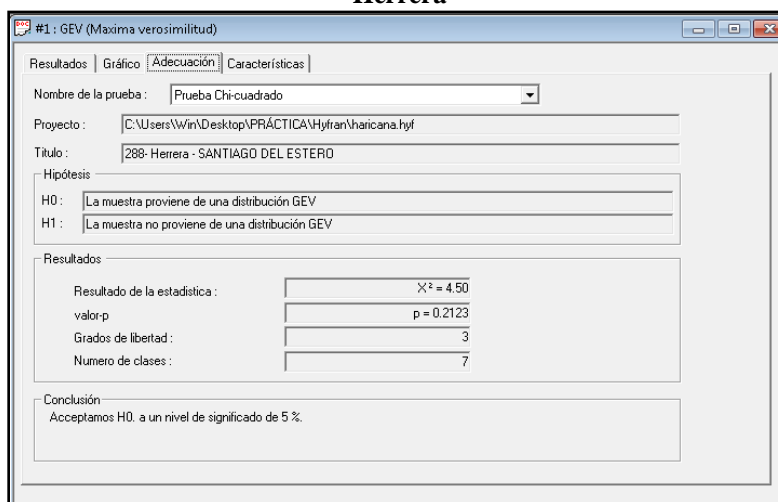


Figura 16: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Herrera

De la tabla 14 a la 19 se muestran los resultados del análisis inferencial realizado sobre los registros de la estación Herrera con las distintas distribuciones de probabilidades y métodos de estimación de parámetros.

GEV (MÉTODO DE MOMENTOS)					
Numero de observaciones 28					
Parámetros					
alpha	33				
k	0.01633				
u	70				
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					
T [años]	Probabilidad de no-	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000	0.9999	352.89	183	N/D	N/D
2000	0.9995	306.41	124	N/D	N/D
1000	0.999	286.01	102	N/D	N/D
200	0.995	237.68	59	N/D	N/D
100	0.99	216.43	45	N/D	N/D
50	0.98	194.85	33	130.66	259.04
25	0.96	172.86	23	127.24	218.48
20	0.95	165.67	21	124.81	206.52
10	0.9	142.82	15	113.37	172.26
5	0.8	118.71	12	96.076	141.33
3	0.6667	99.31	10	80.247	118.36
2	0.5	81.73	8	66	97.733
1	0.3	63.46	7	50	76.654
1	0.2	53.79	6	41	67
1	0.1	41.80	7	27	56
1	0.05	32.95	9	15	50
1	0.02	23.93	11	2	46
1	0.01	18.39	13	-7	44
1	0.005	13.63	15	-15	42
1	0.001	4.58	18	-31	40
1	0.0005	1.30	20	-37	40
1	0.0001	-5.28	23	-50	39

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 GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 28 años de la Estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

GUMBEL (MÉTODO DE MOMENTOS)					
Numero de observaciones 28					
Parámetros					
u	69				
alpha	32				
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					
T [años]	Probabilidad de no-	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000	0.9999	368.30	60	250.38	486.22
2000	0.9995	316.07	50	218.3	413.85
1000	0.999	293.58	45	204.46	382.7
200	0.995	241.30	35	172.22	310.38
100	0.99	218.73	31	158.24	279.22
50	0.98	196.08	26	144.15	248
25	0.96	173.26	22	129.86	216.65
20	0.95	165.85	21	125.19	206.51
10	0.9	142.50	16	110.31	174.68
5	0.8	118.15	12	94.322	141.98
3	0.6667	98.78	9	80.797	116.75
2	0.5	81.38	7	67	95.528
1	0.3	63.47	7	50	76.467
1	0.2	54.05	7	40	68
1	0.1	42.43	8	26	58
1	0.05	33.89	9	16	52
1	0.02	25.23	11	5	46
1	0.01	19.94	11	-2	42
1	0.005	15.39	12	-8	39
1	0.001	6.79	14	-20	33
1	0.0005	3.68	14	-24	31
1	0.0001	-2.55	15	-32	27

Tabla 15: 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 momentos) sobre los registros de 28 años de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

Log-Pearson tipo III (Método de momentos (BOB), basis = 10)					
Numero de observaciones 28					
Parámetros					
alpha	-26				
lambda	29				
m	3				
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					
T [años]	Probabilidad de no-	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000	0.9999	323.13	149	N/D	N/D
2000	0.9995	286.8	104	N/D	N/D
1000	0.999	270.4	87	N/D	N/D
200	0.995	230.14	52	N/D	N/D
100	0.99	211.67	40	N/D	N/D
50	0.98	192.36	30	133.63	251.08
25	0.96	172.04	22	129	215.08
20	0.95	165.25	20	126.24	204.25
10	0.9	143.19	15	113.89	172.48
5	0.8	119.19	12	96.265	142.12
3	0.6667	99.658	10	80.729	118.59
2	0.5	81.489	8	66	97.175
1	0.3	63	7	50	75.918
1	0.2	53	6	41	66
1	0.1	42	7	29	55
1	0.05	34	7	20	49
1	0.02	27	8	12	42
1	0.01	23	8	7	39
1	0.005	20	8	3	36
1	0.001	14	8	-2	30
1	0.0005	12	8	-3	28
1	0.0001	9	7	-6	24

Tabla 16: 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 28 años de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

GEV (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 28						
Parámetros						
alpha	27					
k	-0.199949					
u	67					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T [años]	Probabilidad de no-	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)		
				Inferior [mm]	Superior [mm]	
10000	0.9999	770.90	637.38	N/D	N/D	
2000	0.9995	540.71	343.25	N/D	N/D	
1000	0.999	462.23	257	N/D	N/D	
200	0.995	316.85	122	N/D	N/D	
100	0.99	267.19	85	N/D	N/D	
50	0.98	223.84	57	N/D	N/D	
25	0.96	185.86	37	113.1	258.62	
20	0.95	174.65	32	111.48	237.82	
10	0.9	142.45	20	103.29	181.61	
5	0.8	113.47	12	89.413	137.52	
3	0.6667	93.32	9	76.183	110.45	
2	0.5	77.17	7	64	90.316	
1	0.3	62.25	5	52	72.497	
1	0.2	55.04	5	46	64	
1	0.1	46.71	4	38	55	
1	0.05	40.95	5	32	50	
1	0.02	35.42	5	25	46	
1	0.01	32.18	6	21	44	
1	0.005	29.48	6	17	42	
1	0.001	24.57	8	10	39	
1	0.0005	22.86	8	7	39	
1	0.0001	19.53	9	2	37	

Tabla 17: 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 28 años de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

Gumbel (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 28						
Parámetros						
u	70					
alpha	30					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T [años]	Probabilidad de no-	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)		
				Inferior [mm]	Superior [mm]	
10000	0.9999	346.77	44	260.16	433.37	
2000	0.9995	298.33	37	225.99	370.67	
1000	0.999	277.46	34	211.25	343.68	
200	0.995	228.97	27	176.91	281.03	
100	0.99	208.04	23	162.04	254.04	
50	0.98	187.03	20	147.06	226.99	
25	0.96	165.86	17	131.9	199.83	
20	0.95	158.99	16	126.95	191.03	
10	0.9	137.33	13	111.23	163.43	
5	0.8	114.75	10	94.516	134.98	
3	0.6667	96.78	8	80.732	112.82	
2	0.5	80.64	7	68	93.669	
1	0.3	64.03	6	53	75.318	
1	0.2	55.29	6	44	66	
1	0.1	44.52	6	33	56	
1	0.05	36.60	7	24	49	
1	0.02	28.57	7	14	43	
1	0.01	23.66	8	9	39	
1	0.005	19.44	8	3	35	
1	0.001	11.46	9	-6	29	
1	0.0005	8.58	9	-10	27	
1	0.0001	2.80	10	-17	23	

Tabla 18: Estimación de laminas 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 28 años de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

Lognormal (Maxima verosimilitud)					
Numero de observaciones 28					
Parámetros					
mu	4				
sigma	0.447148				
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					
T [años]	Probabilidad de no-	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000	0.9999	421.66	102	221.97	621.34
2000	0.9995	348.16	76	199.82	496.49
1000	0.999	318.34	66	189.67	447
200	0.995	252.94	45	164.63	341.25
100	0.99	226.24	37	153.11	299.37
50	0.98	200.28	30	141.04	259.52
25	0.96	174.89	24	128.28	221.51
20	0.95	166.81	22	123.97	209.65
10	0.9	141.79	16	109.82	173.75
5	0.8	116.45	12	93.893	139
3	0.6667	96.89	9	80.088	113.7
2	0.5	79.93	7	66.692	93.175
1	0.3	63.24	6	52	74.433
1	0.2	54.87	5	44	65
1	0.1	45.06	5	35	55
1	0.05	38.30	5	28	48
1	0.02	31.90	5	22	41
1	0.01	28.24	5	19	37
1	0.005	25.26	4	16	34
1	0.001	20.07	4	12	28
1	0.0005	18.35	4	11	26
1	0.0001	15.15	4	8	22

Tabla 19: Estimación de laminas 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 28 años de la estación Herrera (código interno 288), en Santiago del Estero

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 (Ver Figura 18). 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 que el 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 Figura 17 (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.

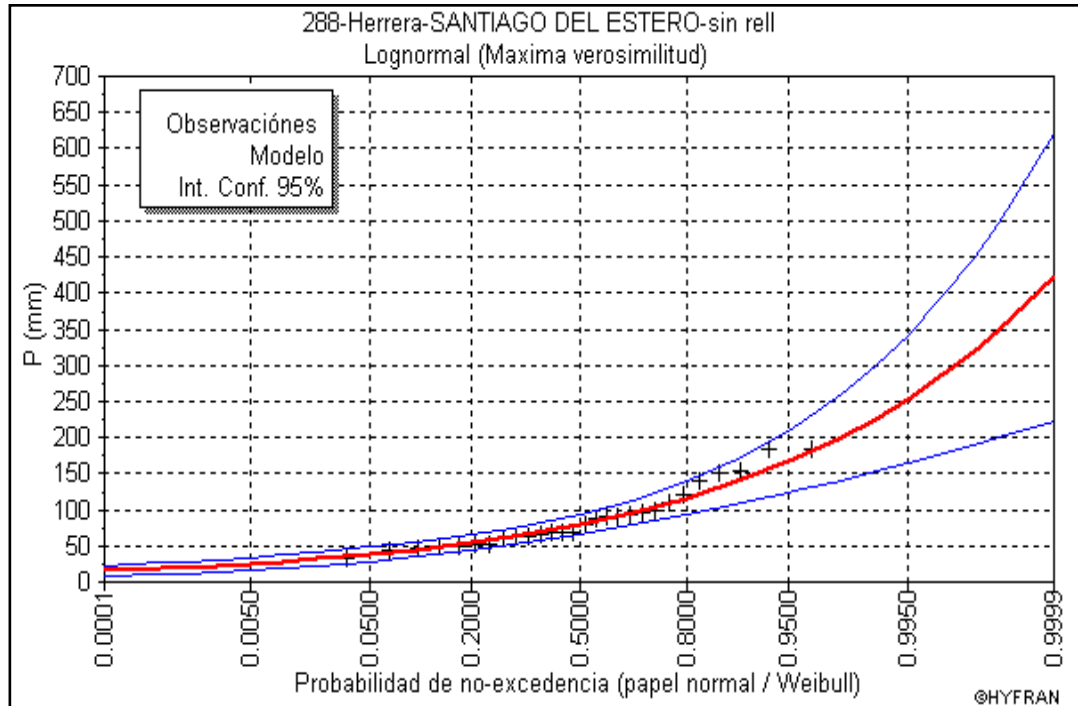


Figura 17: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación Herrera (código interno 288),

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 (Ver Tabla 20) en donde se resumen los valores de láminas de lluvia para los distintos periodos de retorno obtenidos con las distintas funciones de distribución de probabilidad.

Tr	Precipitación Máxima Diaria Esperada para T(mm)				
	GEV (M verosimilitud)	Gumbel (M verosimilitud) (Momentos)		LogNormal (M verosimilitud)	LogPearson III (Momentos)
100	267.19	208.04	218.73	226.24	211.67
50	223.84	187.03	196.08	200.28	192.36
25	185.86	165.86	173.26	174.89	172.04
20	174.65	158.99	165.85	166.81	165.25
10	142.45	137.33	142.50	141.79	143.19
5	113.47	114.75	118.15	116.45	119.19

Tabla 20: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste

En la Tabla 21 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	84.67%	95.66%	91.96%	96.68%	100.00%	93.56%
50	89.47%	97.29%	93.38%	97.90%	100.00%	96.05%
25	94.10%	98.84%	94.84%	99.07%	100.00%	98.37%
20	95.51%	99.32%	95.31%	99.42%	100.00%	99.06%
10	99.54%	99.28%	96.85%	99.50%	100.00%	99.02%
5	97.44%	98.10%	98.54%	98.56%	100.00%	97.70%

Tabla 21: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)

Como se puede verificar en la tabla anterior, para periodos menores a los 50 años, las diferencias resultantes, según las diferentes funciones de distribución son menores al 11%.

Mientras que para un periodo de retorno de 100 años, la diferencia resultante es aún mayor.

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

Para concluir con estas pruebas se compararon en un mismo gráfico (Ver Figura 18 y Figura 19) las distintas funciones de distribución de probabilidad utilizadas.

Se observó que hasta para un período de retorno de 200 años inclusive (probabilidad de no-excedencia de 0,995) las diferencias entre las distintas funciones propuestas no son significativas, si el ajuste es realizado por el Método de Momentos. En el caso de ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud, la diferencia para un periodo de 100 años sigue siendo

pequeña, mientras que para un periodo de 200 años, dicha diferencia comienza a ser más mayor.

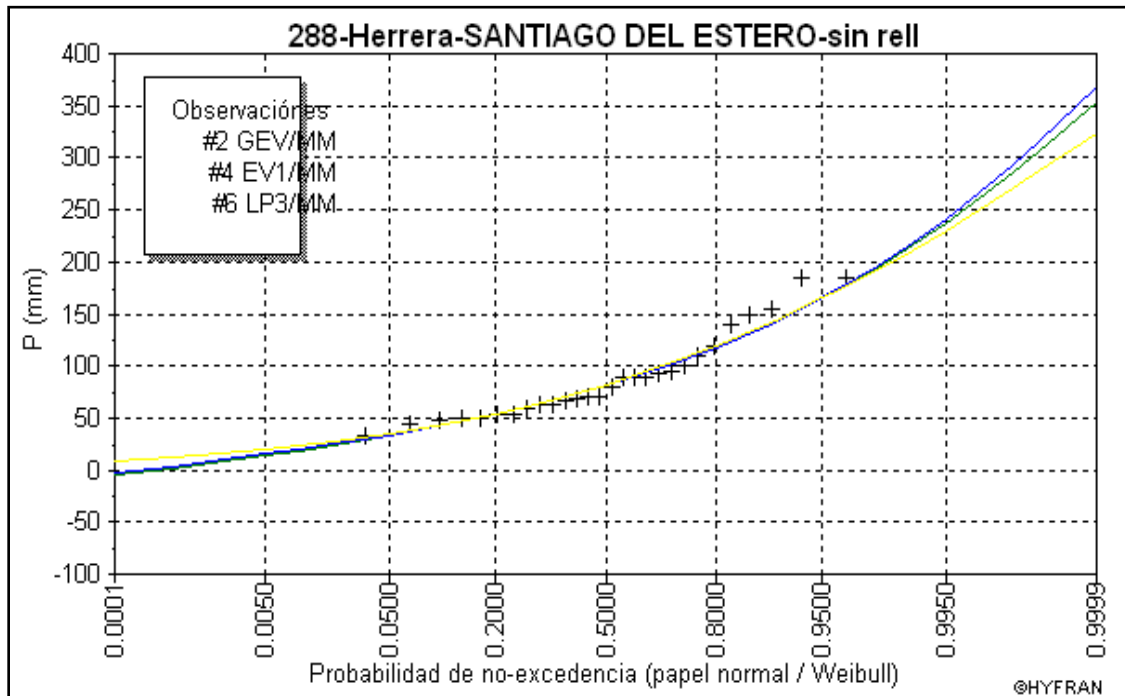


Figura 18: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos

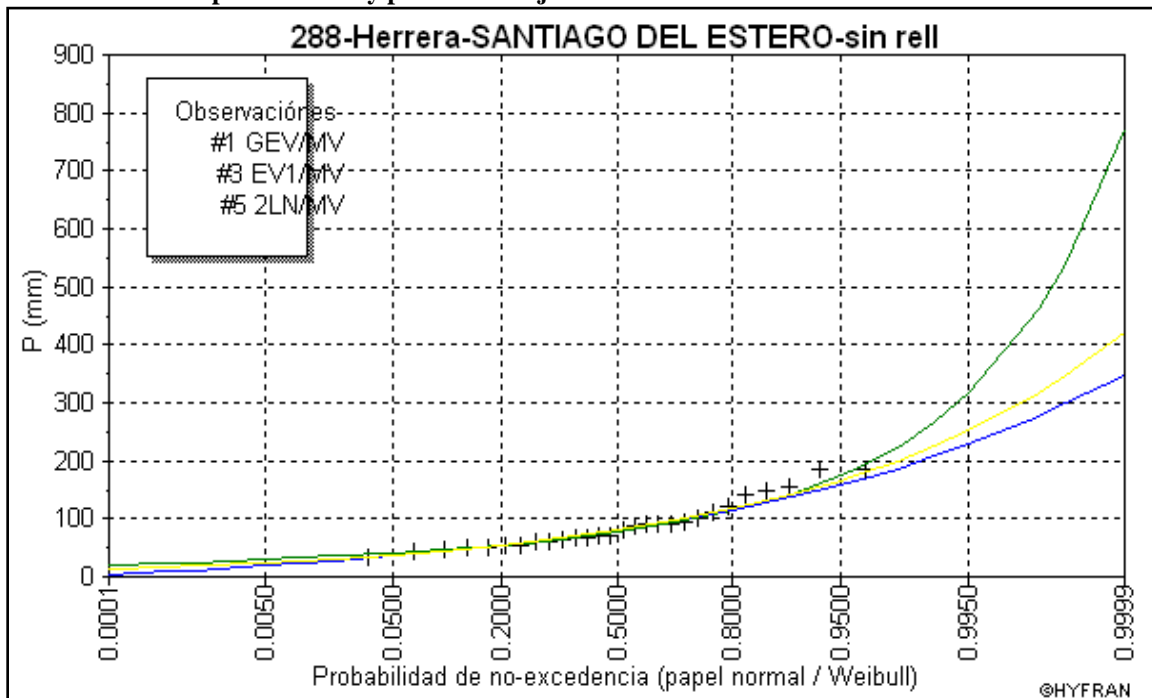


Figura 19: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de máxima verosimilitud

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS

En este apartado se busca sintetizar los resultados más relevantes de la información de las estaciones analizadas de Santiago del Estero en el capítulo anterior (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

Las series de datos de las 87 estaciones pluviométricas que tenían una longitud de serie acorde a lo descrito en la sección 3.2, fueron sometidas a la detección de datos atípicos. De las mismas, un total de 10 estaciones ha evidenciado más de dos valores atípicos: Toropan, Ancocha, Urutau, Roversi, La Fragua, Nueva Esperanza, Santo Domingo, Palo Negro, Garza, Tacañitas. (Tabla 22), por lo cual fueron rechazadas. La eliminación de las mismas corresponde al 11,5% de las estaciones totales.

	Estaciones Pluviométricas	Logitud de serie	Latitud	Longitud
291	Toropan	23	-63.590	-28.539
299	Ancocha	13	-62.720	-28.829
311	Urutau	23	-63.025	-25.761
339	Roversi	21	-61.881	-27.586
349	La Fragua	24	-64.307	-26.117
351	Nueva Esperanza	24	-64.215	-26.276
354	San Francisco	21	-63.171	-29.439
358	Palo Negro	23	-61.995	-29.658
369	Garza	25	-63.402	-28.188
375	Tacañitas	13	-62.502	-28.632

Tabla 22: Estaciones pluviométricas con más de dos Datos Atípicos

5.1.2. Prueba de Independencia

Las estaciones que verificaron fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). Del total de estaciones analizadas, sólo dos estaciones no pasaron la prueba, lo cual constituye el 3,4% del total. (Tabla23)

	Estaciones pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
313	Frias-SANTIAGO DEL ESTERO	28	-65.044	-28.716
324	Santa Catalina-SANTIAGO DEL ESTERO	24	-64.682	-28.213
368	Brea Pozo-SANTIAGO DEL ESTERO	26	-63.844	-28.285

Tabla 23: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios

5.1.3. Prueba de Estacionaridad

Las estaciones que verificaron fueron sometidas a la Prueba de Estacionaridad (Kendall). Las estaciones que se encuentran en la Tabla 24 han rechazado esta prueba.

Son 4 estaciones las que fueron eliminadas, lo cual representa el 4,6% del total de información disponible.

	Estaciones pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
331	Yuchan-SANTIAGO DEL ESTERO	26	-62.892	-27.802
338	Quimili-SANTIAGO DEL ESTERO	27	-62.348	-27.671
348	Ahí Veremos-SANTIAGO DEL ESTERO	21	-63.882	-25.947
368	Brea Pozo-SANTIAGO DEL ESTERO	26	-63.844	-28.285

Tabla 24: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionaridad

5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual

Las 70 estaciones restantes fueron sometidas a esta prueba y cumplieron con la misma. Finalmente, de las 91 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, sólo 73 pasaron las pruebas representando estas el 81% del total.

5.1.5. Contraste entre los valores de lluvias máximas 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 compara, en porcentaje, los valores de la lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno asociadas a las distintas funciones de distribución con respecto a la "LogNormal", con un análisis similar al mostrado en la sección 4.4.2.

Se puede observar en la Figura 18 que las estaciones son prácticamente todas homogéneas, presentando porcentajes similares dentro de un rango entre 0-40%.

La máxima diferencia de valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la LogNormal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.

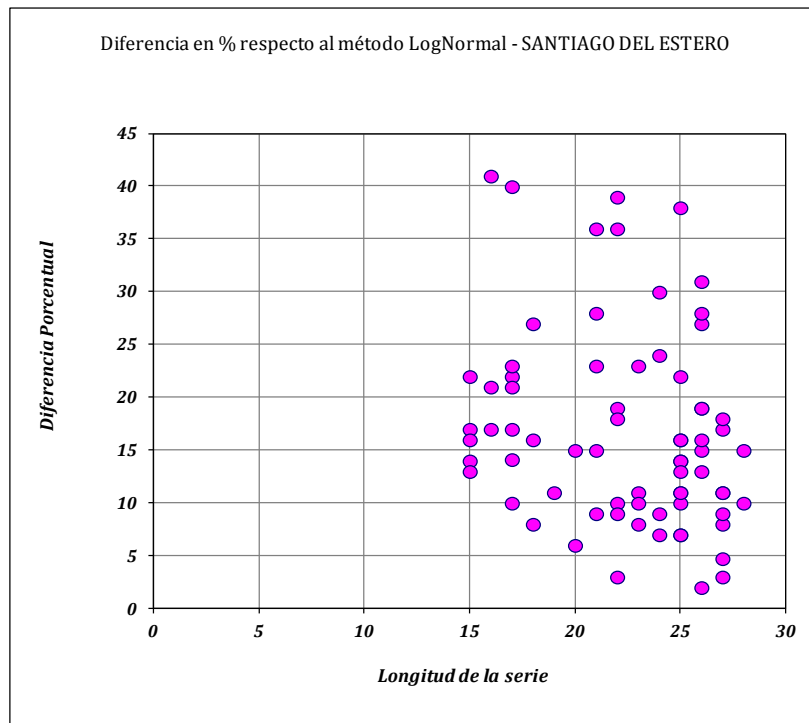


Figura 2020: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie, para la provincia de Santiago del Estero

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se realiza un análisis para 100 años de periodo de retorno. Se elige este valor (y no los asociados a otros periodos de retorno) por ser el que más diferencia muestra en relación a los demás.

En este análisis se compara la diferencia porcentual, mostrada en la Figura 24, con los intervalos de confianza de la estimación de la función Log Normal, que demuestra la incertidumbre de este método. (Ver Figura 25)

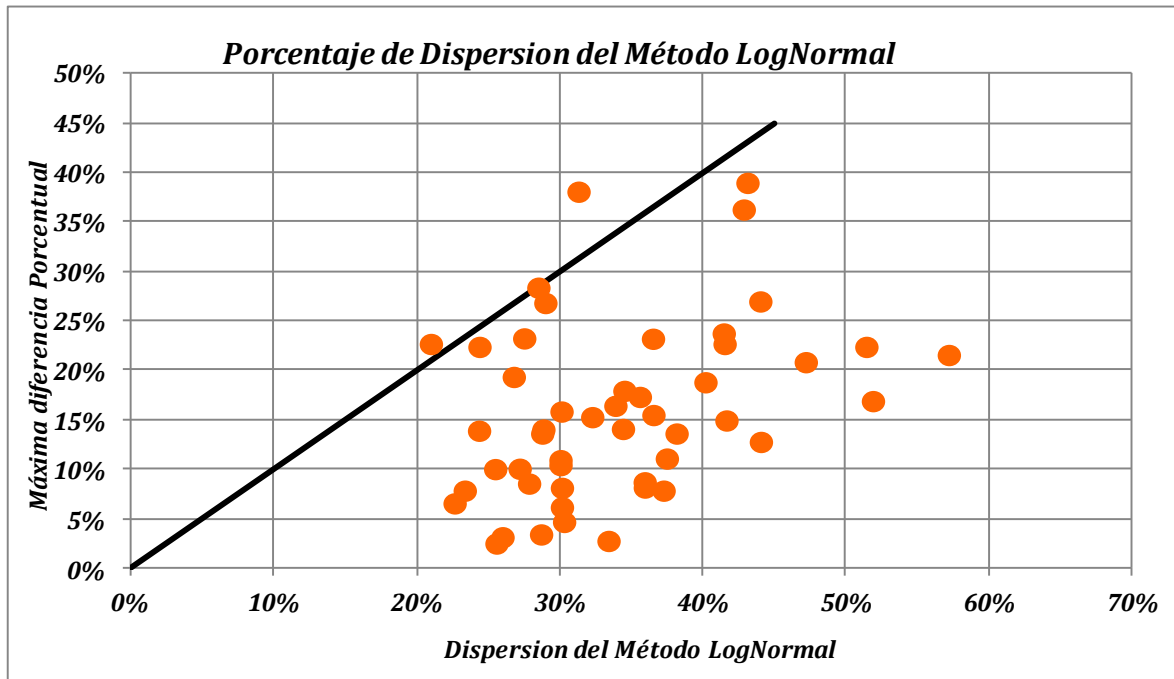


Figura 21: Análisis de dispersión del método LogNormal para la provincia de Santiago del Estero

Del análisis mostrado se observó que la incertidumbre de la estimación Lognormal (debido a la longitud de la serie) es mayor que la diferencia porcentual debido a la función de distribución seleccionada.

5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Se conformó una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes – Valor máximo de lámina de lluvia anual, Media y Desvío – de las estaciones finalmente seleccionadas (Ver Tabla 25). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

CÓDIGO INTERNO	Nombre de la Estación	Máximo	Media	Desvío
285	El Oso	170	92.06	32.47
286	Pinto	193	84.74	35.62
287	Colonia Dora	184	72.12	48.02
288	Herrera	185	88.21	41.61
289	Icano	129	72.61	33.14
290	Lugones	130	74.11	28.88
292	Villa Mailin	207	105.96	38.69
293	Campo Gallo	207	87.19	39.43
294	El Porvenir	175	78.24	32.52
295	Huachana	150	74.31	34.45
296	Monte Rico	238	91.64	44.76
297	Santos Lugares	208	85.14	43.05
298	Sachayoj	127	90.07	21.29
300	Villa Atamisqui	149	80.15	31.59
301	La Banda	130	67.93	26.86
302	Clodomira	152	71.26	25.7
303	Bandera	196	105.62	39.56
304	Cuatro Bocas	215	95.64	44.86
305	Fortin Inca	180	87.2	38.46
306	Santiago del Estero	166.1	94.31	28.9
307	Los Piripintos	165	83.65	31.49
308	Monte Quemado	140	89.88	26.88
309	Pampa de los Guanacos	188	103.4	30.03
310	San Jose de Boqueron	180	93	33.97
312	Villa Matoque	140	87.77	31.21
314	Laprida	160	64.35	33.68
315	La Vuelta	145	66.29	28.62
316	Villa La Punta	140	70.93	27.86
317	Bandera Bajada	145	76.15	27.26
318	La Cañada	155	81.64	34.98
319	Villa Figueroa	118	74.06	25.13
320	Doña Luisa	140	74.6	27.3
321	Guampacha	150	70.6	36.21
322	Lavalle	180	70.5	35.8
323	San Pedro	160	76.17	37
325	Villa Guasayan	145	70.42	28.63
326	El Arenal	162	93.76	40.88
327	El Bobadal	190	97.36	38
328	El Charco	155	72.33	31.03
329	Pozo Hondo	134	61.85	21.61
330	Suncho Corral	135	84.27	28.86
331	Yuchan	216	81.96	42.46
332	Campo del Cielo	197	99.2	48.59
333	Loreto	130	69.7	26.53
334	Las Tinajas	180	82.83	44.5
335	Libertad	190	94.47	39.68
336	Lilo Viejo	150	78.72	28.28
337	Otumpa	123	86.81	26.53
338	Quimili	200	95.4	37.92
340	Tintina	165	95.41	27.14
341	Weisburd	250	106.76	57.16
342	Km. 49	100	65.77	21.54
343	La Isla	100	59.4	19.28
344	Ojo de Agua	150	76.71	25.95
345	Sol de Julio	157	77.76	32.16
346	Villa Union	140	82.43	26.75
347	Agua Amarga	120	68.1	26.04
348	Ahí Veremos	100	61.52	19.53
350	Las Delicias	180	84.32	31.95
352	Rapelli	189	84.04	42.04

Tabla 25: Parte de los datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales registradas en las estaciones finalmente seleccionadas

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 (Ver Tabla 26 y 27). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Cod.	Cod. Interno	Nombre de la estación	PMD2	PMD5	PMD10	PMD20	PMD25	PMD50	PMD100
1	285	El Oso	86.59	118.06	138.84	158.74	165.05	184.54	204.04
2	286	Pinto	78.19	110.61	132.61	154.05	160.92	182.33	204.02
3	287	Colonia Dora	60.22	100.78	131.94	164.8	175.83	211.67	250.09
4	288	Herrera	79.93	116.45	141.79	166.81	174.89	200.28	226.24
5	289	Icano	65.27	98.18	121.56	145	152.64	176.83	201.83
6	290	Lugones	68.83	96.6	115.35	133.54	139.36	157.46	175.74
7	292	Villa Mailin	98.92	137.78	163.86	189.08	197.13	222.12	247.3
8	293	Campo Gallo	78.54	118.04	146.07	174.18	183.34	212.31	242.26
9	294	El Porvenir	72.51	101.44	120.92	139.8	145.83	164.58	183.49
10	295	Huachana	66.84	100.87	125.11	149.45	157.39	182.54	208.57
11	296	Monte Rico	82.93	121.7	148.75	175.56	184.24	211.54	239.53
12	297	Santos Lugares	77.11	111.69	135.57	159.1	166.69	190.49	214.78
13	298	Sachayoj	87.66	107.65	119.87	130.99	134.43	144.75	154.72
14	300	Villa Atamisqui	74.64	103.77	123.3	142.16	148.18	166.85	185.65
15	301	La Banda	63.34	86.98	102.69	117.77	122.56	137.4	152.27
16	302	Clodomira	67.14	90.4	105.63	120.12	124.7	138.81	152.86
17	303	Bandera	99.17	133.96	156.79	178.55	185.43	206.65	227.8
18	304	Cuatro Bocas	85.72	129.64	160.96	192.45	202.73	235.31	269.05
19	305	Fortin Inca	80.18	113.14	135.48	157.2	164.16	185.85	207.78
20	306	Santiago del Estero	90.11	117.15	134.4	150.53	155.59	171.02	186.19
21	307	Los Piripintos	78.25	107.51	126.96	145.64	151.58	169.95	188.38
22	308	Monte Quemado	86.12	110.77	126.36	140.87	145.4	159.2	172.72
23	309	Pampa de los Guanacos	99.26	127.35	145.09	161.58	166.73	182.39	197.73
24	310	San Jose de Boqueron	87.62	117.73	137.41	156.12	162.03	180.22	141.33
25	312	Villa Matoque	82.03	113.58	134.67	155	161.48	181.57	201.76
26	314	Laprida	57.36	86.27	106.8	127.39	134.1	155.34	177.29
27	315	La Vuelta	60.82	87.28	105.44	123.25	128.98	146.9	165.14
28	316	Villa La Punta	66.13	90.97	107.48	123.35	128.4	144.03	159.7
29	317	Bandera Bajada	71.8	96.49	112.62	127.96	132.8	147.72	162.56
30	318	La Cañada	72.92	113.65	143.39	173.69	183.67	215.52	248.85
31	319	Villa Figueroa	70	94.07	109.8	124.75	129.47	144.02	158.49
32	320	Doña Luisa	69.81	95.89	113.21	129.84	135.13	151.5	167.91
33	321	Guampacha	62.54	96.85	121.75	147.07	155.39	181.9	209.59
34	322	Lavalle	64.62	96.25	117.2	137.29	143.66	163.29	182.78
35	323	San Pedro	68.71	100.94	123.44	145.76	152.98	175.72	199.04
36	325	Villa Guasayan	64.64	93.74	113.87	133.7	140.1	160.18	180.68
37	326	El Arenal	84.03	129.25	161.92	195.03	205.89	240.44	276.43
38	327	El Bobadal	90.53	125.98	149.76	172.75	180.08	202.85	225.77
39	328	El Charco	66.37	96.21	116.85	137.17	143.73	164.31	185.31
40	329	Pozo Hondo	58.52	77.96	90.6	102.57	106.34	117.93	129.42

Tabla 26: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Santiago del Estero

Cod.	Cod. Interno	Nombre de la estación	PMD2	PMD5	PMD10	PMD20	PMD25	PMD50	PMD100
41	330	Suncho Corral	79.01	108.79	128.62	147.68	153.75	172.53	191.37
42	331	Yuchan	71.08	109.76	137.78	166.22	175.56	205.31	236.34
43	332	Campo del Cielo	88.25	136.15	170.82	206	217.55	254.32	292.68
44	333	Loreto	65.31	89.64	105.78	121.3	126.22	141.46	156.74
45	334	Las Tinajas	72.13	112.72	142.38	172.17	182.65	214.52	247.91
46	335	Libertad	91.17	132.5	161.12	189.36	198.48	227.09	256.32
47	336	Lilo Viejo	73.85	101.35	119.6	137.12	142.69	159.92	177.19
48	337	Otumpa	83.55	106.76	121.38	134.94	139.17	152.02	124.37
49	338	Quimili	88.36	123.65	147.42	170.45	177.81	200.7	223.78
50	340	Tintina	93.97	117.81	132.61	146.22	150.44	163.21	175.62
51	341	Weisburd	94.39	143.62	178.89	214.46	226.09	263	301.3
52	342	Km. 49	61.29	84.43	99.24	113.4	117.9	131.77	145.64
53	343	La Isla	56.4	74.67	86.48	97.62	101.13	111.88	122.53
54	344	Ojo de Agua	73.03	95.16	109.3	122.54	126.69	139.37	151.85
55	345	Sol de Julio	72.64	99.17	116.72	133.52	138.86	155.33	171.82
56	346	Villa Union	80.04	105.81	122.46	138.15	143.09	158.23	173.21
57	347	Agua Amarga	63.39	88.25	104.93	121.05	126.2	142.17	158.26
58	348	Ahí Veremos	58.64	76.69	88.25	99.09	102.49	112.9	123.15
59	350	Las Delicias	79.23	106.83	124.93	142.15	147.6	164.38	181.1
60	352	Rapelli	70.48	109.33	137.56	166.29	175.73	205.84	237.3
61	353	Santo Domingo	61.55	81.16	93.79	105.28	109.44	120.91	132.24
62	355	Sumampa	60.33	78.91	91.21	103.01	106.76	118.23	129.73
63	356	Taco Pozo	69.95	100.98	122.37	143.4	150.18	171.42	193.07
64	357	Colonia Alpina	78.72	114.29	138.91	163.19	171.03	195.61	220.73
65	359	Termas	69.21	95.79	113.55	130.66	136.12	153.02	170.01
66	360	Selva	115.21	149.57	171.45	191.91	198.32	217.87	237.09
67	361	Fernandez	83.18	119.73	144.86	169.55	177.5	202.38	227.72
68	362	Barrancas	41.35	73.03	98.34	125.72	135.05	165.76	199.29
69	363	Chilca Juliana	58.4	79.81	93.97	107.54	111.85	125.17	138.5
70	364	Los Telares	70.15	105.08	129.83	154.6	162.66	188.16	214.48
71	365	Rubia Paso	51.81	87.69	115.48	144.95	154.87	187.2	221.99
72	366	Varas Cuchuna	30.82	58.8	82.44	108.96	118.19	149.15	183.86
73	367	Villa Salavino	90.31	122.05	142.89	162.74	169.02	188.39	207.7
74	370	Arraga	78.1	117.59	145.67	173.84	183.02	212.1	242.17
75	371	Añatuya	82.3	115.85	142.22	166.06	173.76	197.76	222.16
76	372	La Nena	82.79	127.41	159.64	192.31	203.03	237.13	272.66
77	373	Los Juries	92.32	129.7	154.45	178.19	185.72	208.92	231.95
78	374	Tomas Young	71.14	104.77	128.3	151.66	159.23	183.06	207.52

Tabla 27: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Santiago del Estero

Finalmente se muestra en la Figura 26 las estaciones que verificaron las pruebas de hipótesis de estadísticas básicas y que fueron analizadas con estadística inferencial.

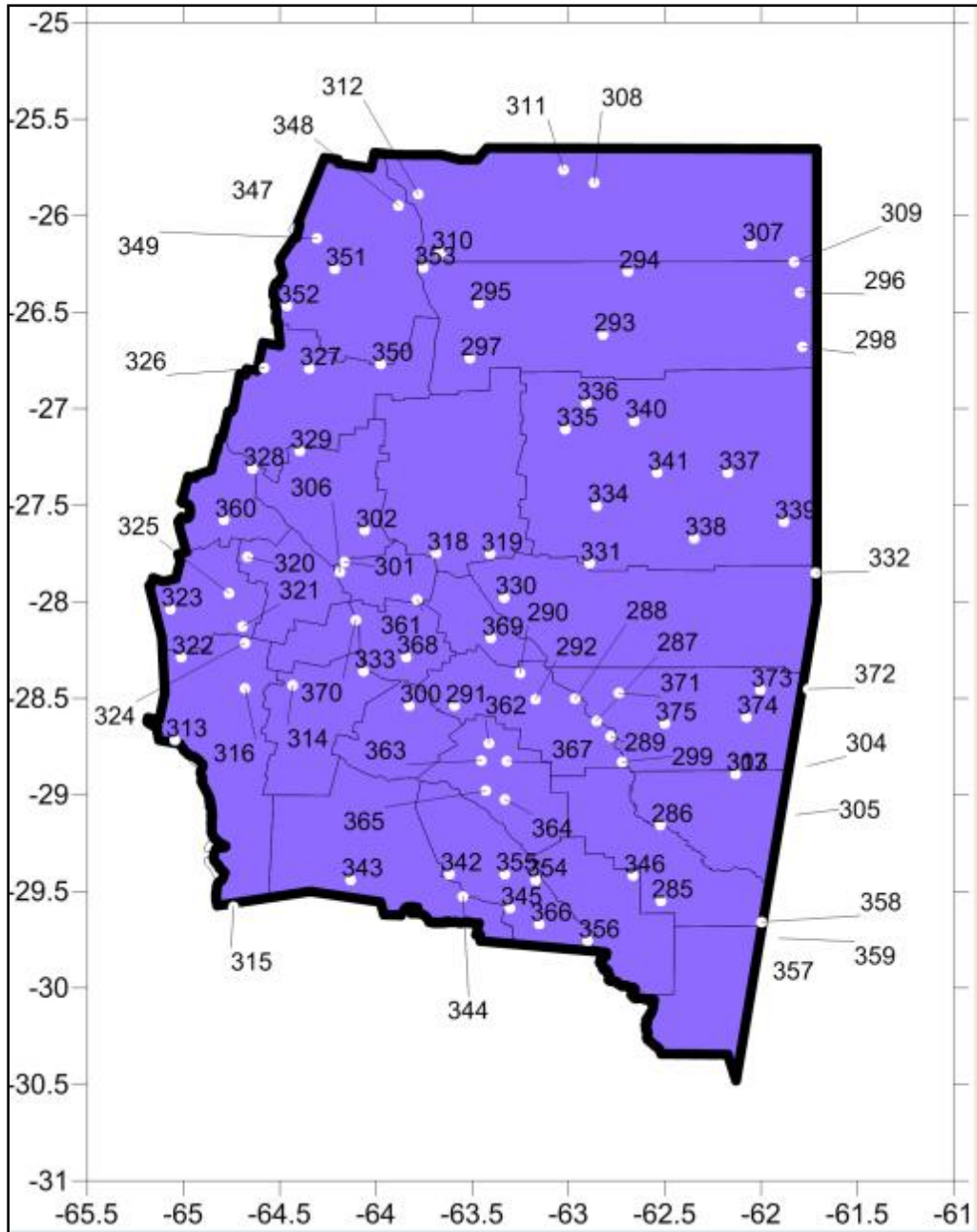


Figura 22: Estaciones finalmente seleccionadas de Santiago del Estero

Capítulo 6

REGIONALIZACIÓN

6. REGIONALIZACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

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 elije la opción DatabaseQuery y luego DatabaseWorkshop (Figura 23) 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 fromExternal File como se muestra en la Figura 24. Finalmente, se debe guardar con la opción Save del menú File.

En la Figura 25 se muestra la salida resultante de este paso, la localización y los valores “z” para cada estación.

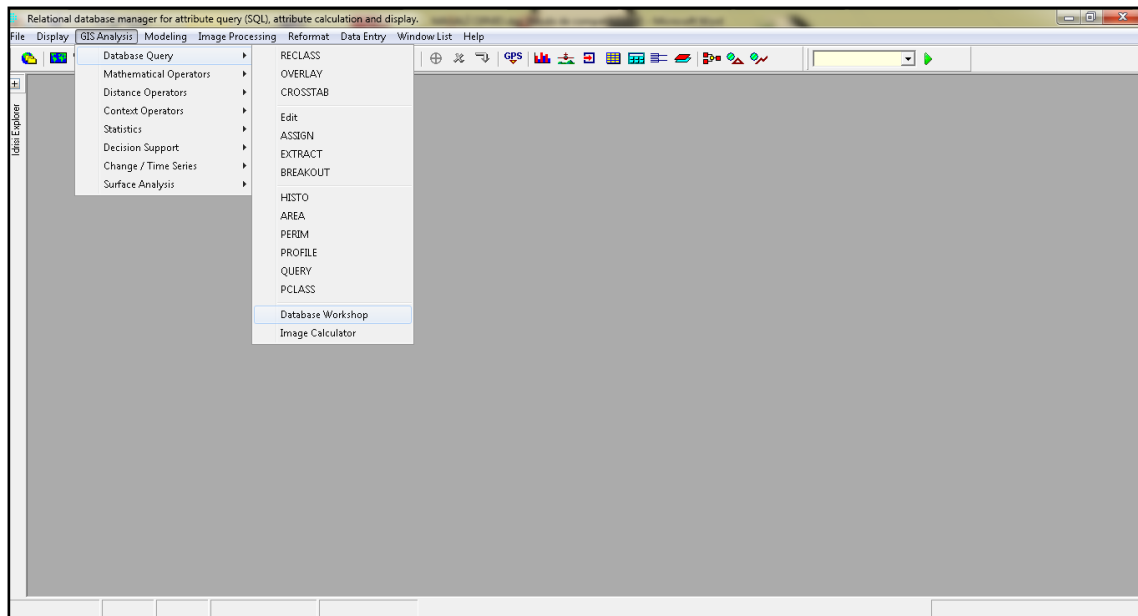


Figura 23: Cuadro de diálogo Database Workshop

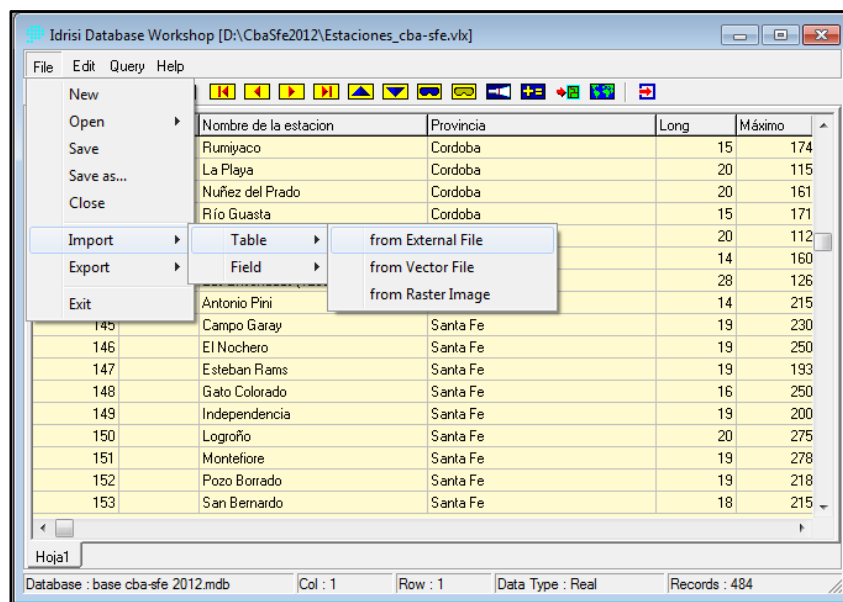


Figura 24: Cuadro de diálogo Database Workshop

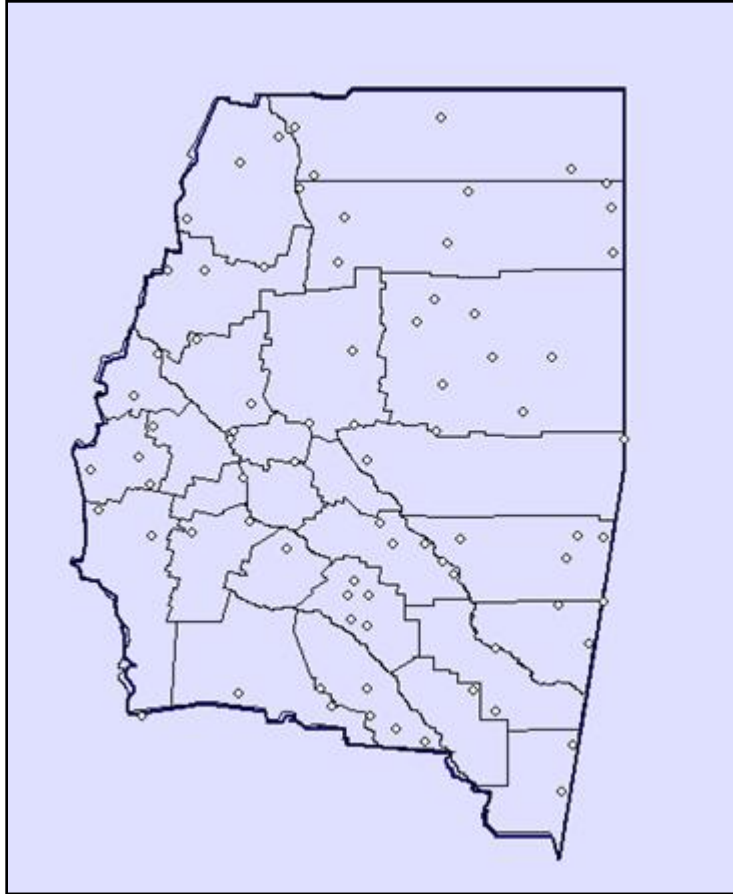


Figura 25: Localización y valor de “z” para cada estación en Santiago del Estero

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 elije 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 26

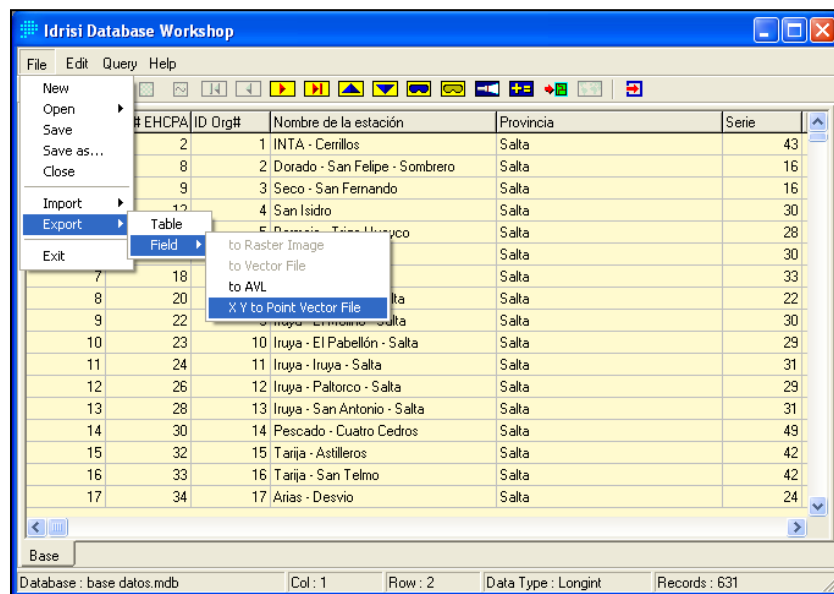


Figura 26: Cuadro de Diálogo Database Workshop – Export

- 3- Luego se debe abrir el cuadro de diálogo Export Vector File como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 27**. 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.

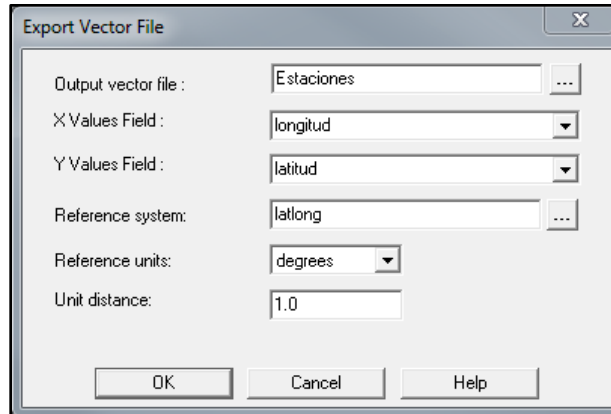



Figura 27: Cuadro de Diálogo Export Vector File

- 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 28.

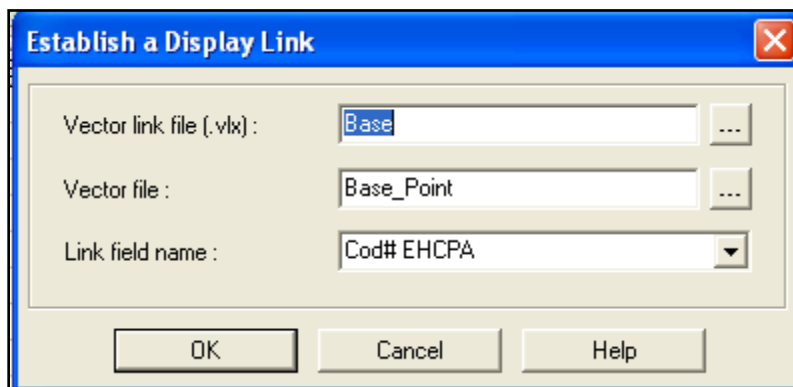


Figura 28: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link

- 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.

- 5- Desde el cuadro DatabaseWorkshop se ejecuta la opción CreateIdrisi Vector File. Aparecerá en pantalla una nueva ventana Export Vector File que se debe completar de la siguiente manera, según la

29.

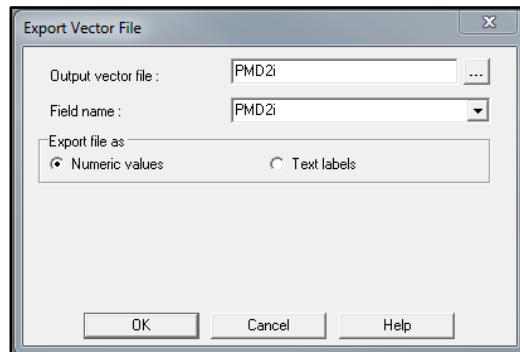


Figura 29: Cuadro de Diálogo Export Vector File

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 30.

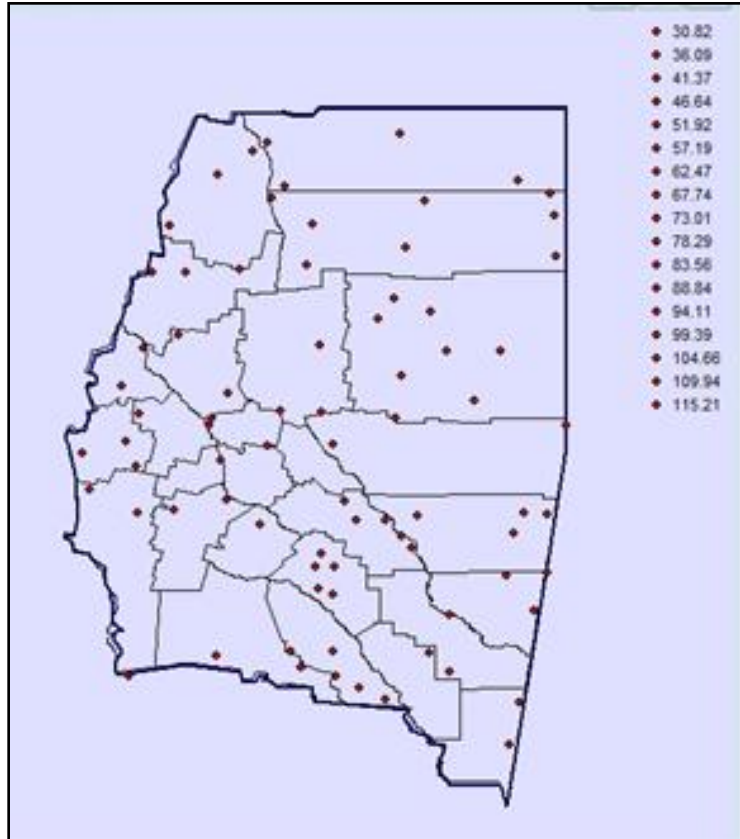


Figura 30: Localización y valores de lluvias máximas diarias para un T= 2 años

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 nos pide la creación de una “mascara”, para delimitar las zonas de interpolación de la variable en cuestión. Para ello se describe a continuación los pasos a seguir:

- a) En Autocad genero la superficie que luego utilizare como mascara, esta debe ser creada con una polilínea cerrada. Una vez terminada guardo el archivo en formato “dxf” – “Autocad R12”.
- b) Importo el archivo dxf a IDRISI, a través de la función “file”, “Import”, “Desktop publishingformats”, “DXFIDRISI” (Ver Figura 31 y Figura 32).

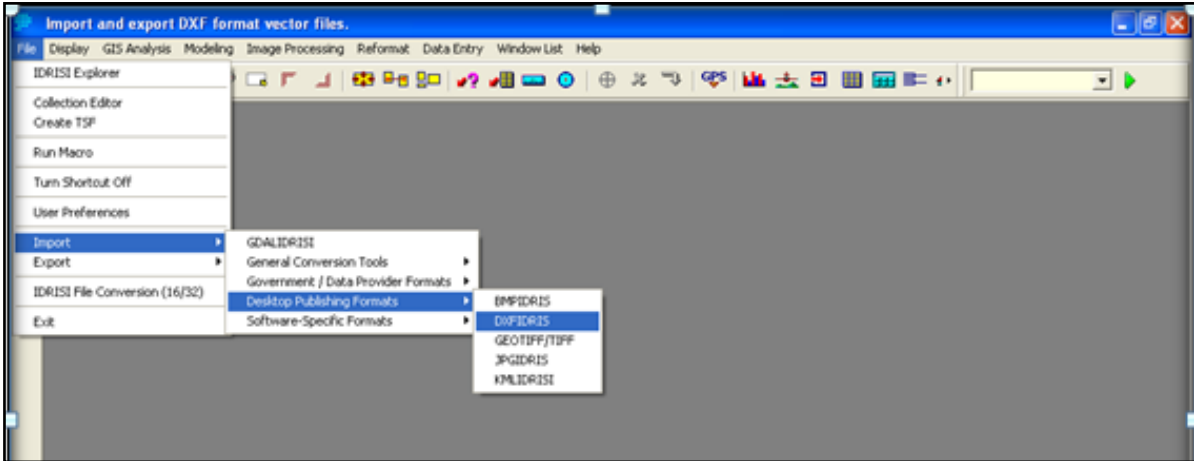


Figura 31: Cuadro de dialogo ImportDxf IDRISI

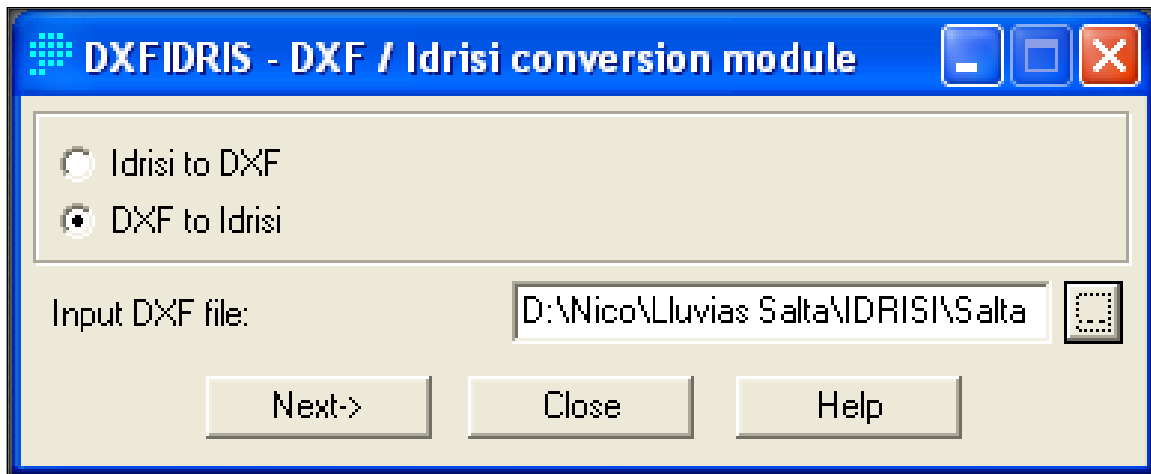


Figura 32: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

- c) Se debe describir la configuración de la superficie, como ser Reference system, Reference units, Featurestoextract. En la Figura 33, se puede apreciar en detalle la metodología.

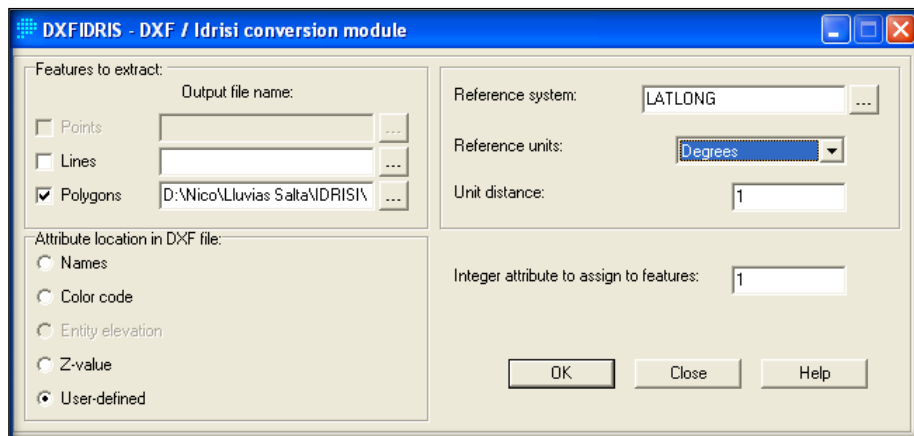
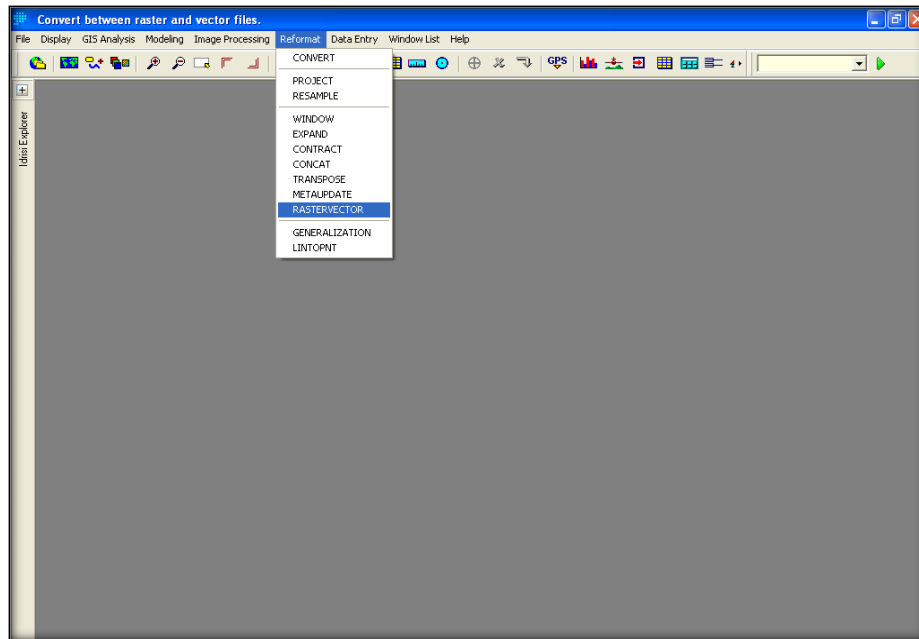


Figura 33: Cuadro de diálogo DXF / Idrisi conversión module

- 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” (Ver Figura 34 y Figura 35).

**Figura 34: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR**

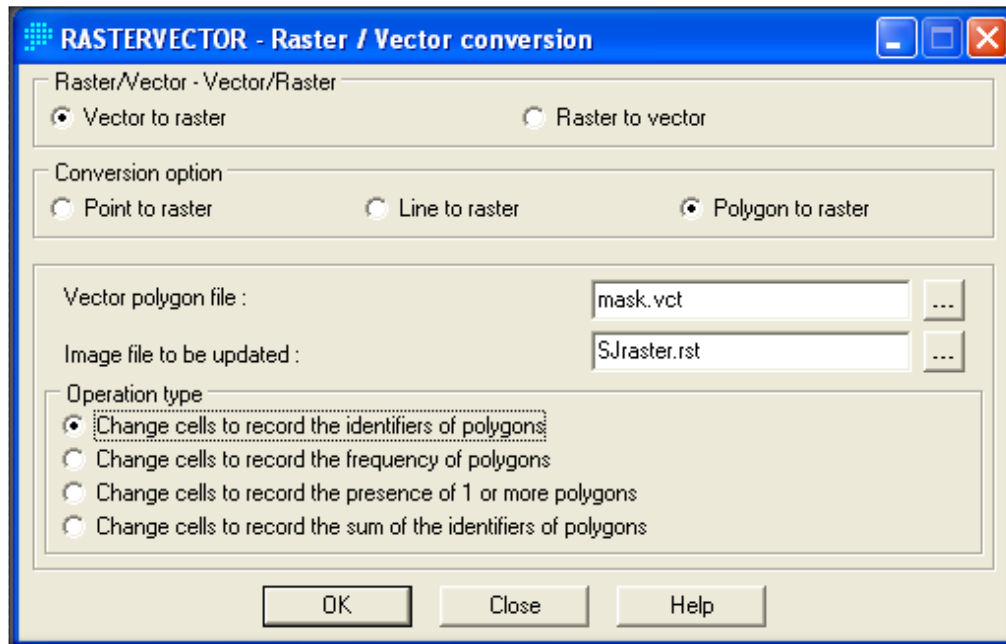


Figura 35: Cuadro de dialogo Raster / Vector conversión

- e) Por último, en la Figura 36, se muestra el formato de salida de la máscara utilizada para la provincia de Santiago del Estero.

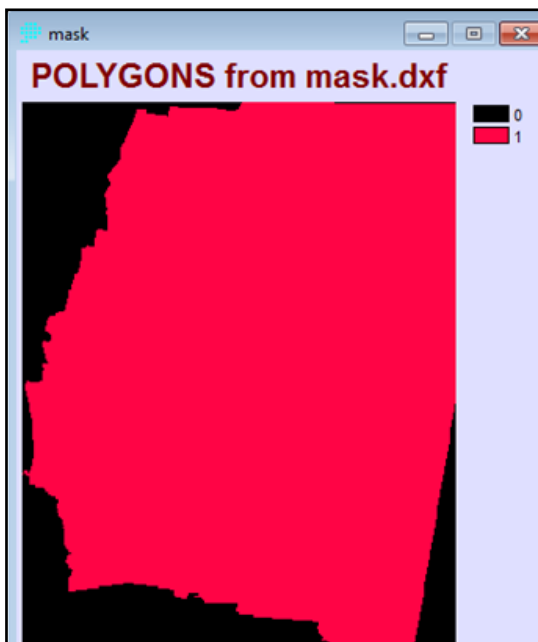


Figura 36: Máscara utilizada para la provincia de Santiago del Estero

6.5. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING

El submenú Kriging conduce a tres interfaces. 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 geoestadísticas es más amplio que el de interpolación, y por lo tanto, también se encuentran disponibles a través del submenú Geoestadística. La geoestadística 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 geoestadísticas 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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 37.
2. En el cuadro de diálogo Kriging and Simulation se completarán las opciones como se muestra en la Figura 38.
3. Al usar una máscara se está delimitando el análisis solo a los pixeles que se encuentran dentro de la provincia (Ver Figura 39).

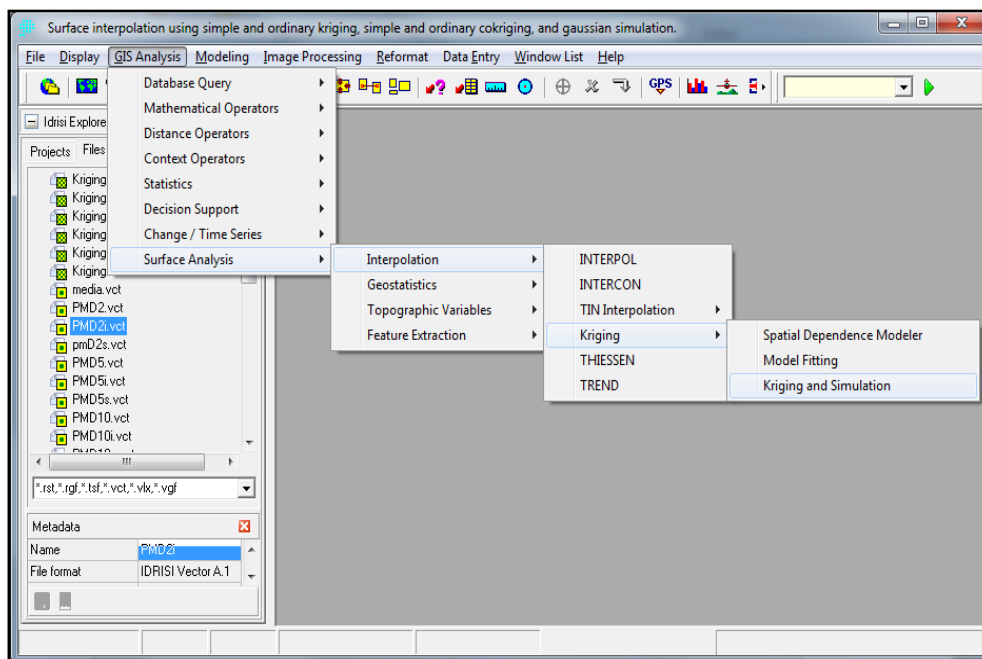


Figura 37: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation

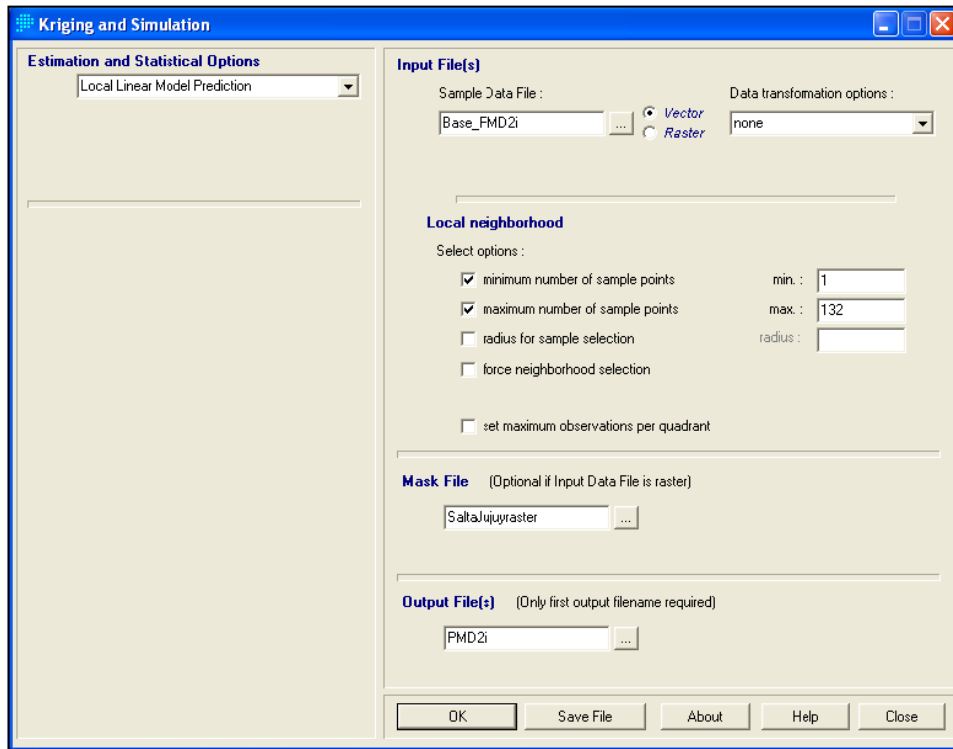


Figura 38: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation

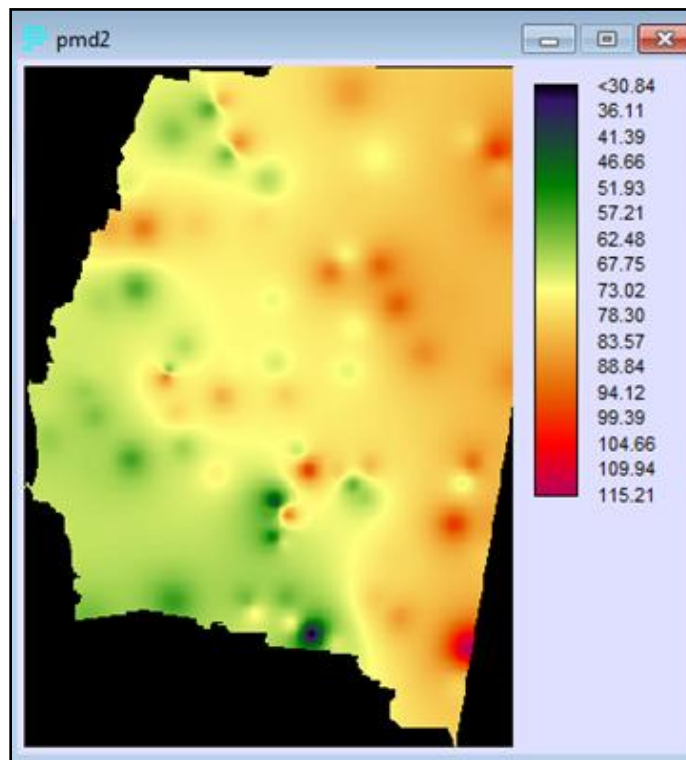


Figura 39: Raster interpolado por el método Kriging para PMD2 (Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años)

6.6. MÉTODO DE ANÁLISIS TENDENCIAL

Las superficies tendenciales son usualmente empleadas para determinar las tendencias espaciales existentes en un grupo de datos. Debido a que la superficie resultante es un modelo matemático ideal, es muy suave y está libre de detalles locales.

El método de análisis tendencial “Trend” es un interpolador global ya que calcula una superficie que ofrece el mejor ajuste, principalmente para todo el grupo de puntos de datos conocidos, pero también es un interpolador inexacto. Los valores de los datos en los puntos conocidos se pueden modificar para coincidir con la superficie más adecuada para todo el grupo de datos. Aplica uno de los tres modelos matemáticamente definidos de superficie ideal (lineal, cuadrática o cúbica) al grupo de datos puntuales de entrada.

Para visualizar cómo funciona “Trend”, el manual de IDRISI da un ejemplo, el cual adaptaremos a nuestro caso. Se supone datos de precipitación en varias estaciones, el modelo de superficie lineal es chato (plano). Imaginar los datos de precipitación como puntos que flotan por encima de la parte superior de una mesa. La altura de cada punto sobre la mesa depende de su precipitación. Ahora suponer un trozo de papel plano ubicado sobre la mesa. Sin doblar el papel en absoluto, se ajusta la inclinación y la altura del mismo de manera tal que la suma de las distancias entre éste y cada punto sea minimizada. Algunos puntos se encuentran por encima del plano del papel y algunos por debajo. Es más, es posible que ningún punto se encuentre en el papel mismo. Sin embargo, la separación general entre el modelo (el plano) y los puntos muestrales es minimizada. A cada píxel en el área de estudio se le puede asignar entonces la precipitación que corresponde con la altura del papel en esa ubicación de píxel.

El mismo ejemplo se puede utilizar para visualizar los modelos de superficie tendencial cuadrática y cúbica. No obstante, en estos casos, está permitido doblar el papel (pero no arrugarlo). La superficie cuadrática permite la presencia de pliegues amplios en el papel, mientras que la cúbica permite pliegues más complejos aún. “Trend” funciona en gran parte como esta analogía exceptuando que una fórmula polinomial que describe el modelo de superficie ideal reemplaza el papel. Esta fórmula se utiliza con el fin de derivar valores para todos los píxeles en la imagen.

6.6.1. Creación de Superficies Tendenciales

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se aplicará la función “Trend” para producir una imagen de superficie tendencial. Los pasos a seguir son los siguientes:

1- En el menú GIS Analysis, seleccionar el submenú SurfaceAnalysis, Interpolation and finalmente hacer clic en “Trend” como se observa en la Figura 40: Secuencia para abrir el método de interpolación de Trend.

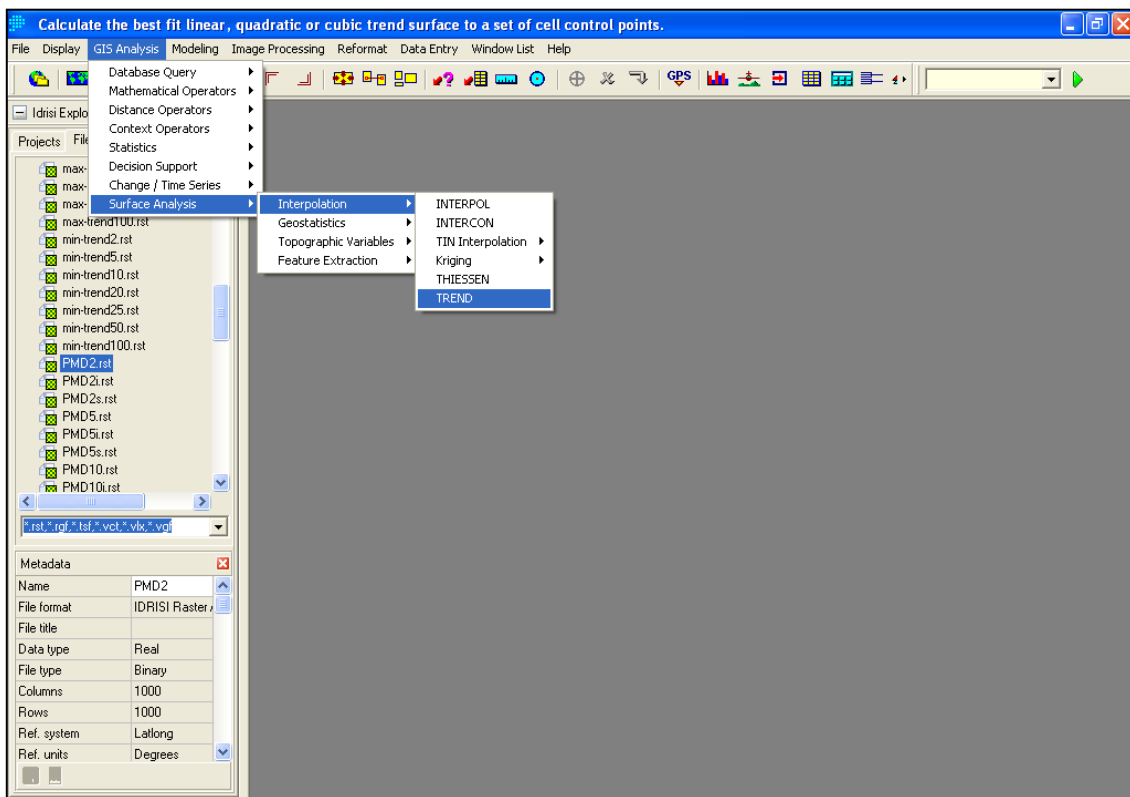


Figura 40: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend

2- Se abrirá el cuadro de diálogo de la Figura 41. En Input image, se debe ingresar cada uno de los archivos raster, de valores medios para distintas recurrencias, obtenidos por el método Kriging. En “Order of surfaceto be fitted” se especifica los valores 1, 2 y 3, que corresponden a las regresiones lineal, cuadrática y cúbica respectivamente.

Además de la superficie interpolada producida (Ver Figura 42), “Trend” informa (en forma de porcentaje) hasta qué punto el modelo elegido asigna los puntos de entrada. También comunica el cociente-F y los grados de libertad, los cuales pueden ser usados para

verificar si la tendencia modelada es significativamente diferente a cero (es decir, ninguna tendencia en absoluto). El archivo de salida se observa en la Figura 43.

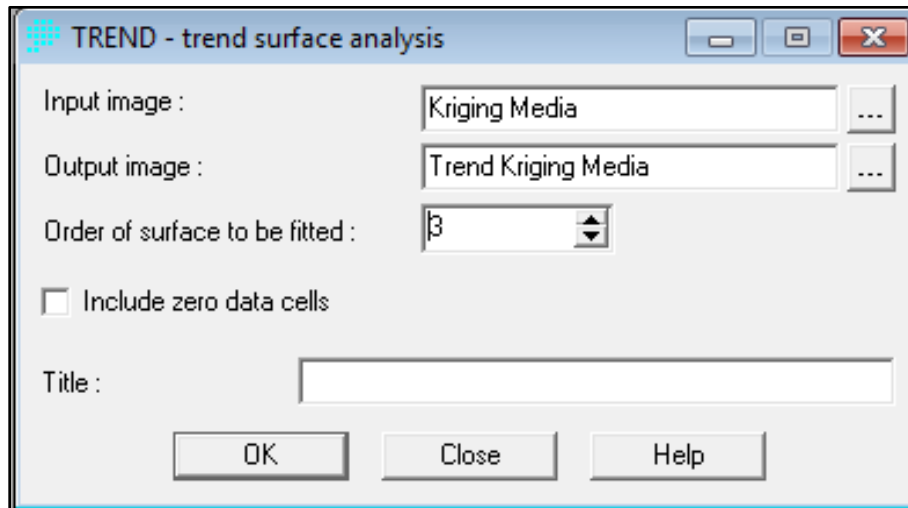


Figura 41: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend

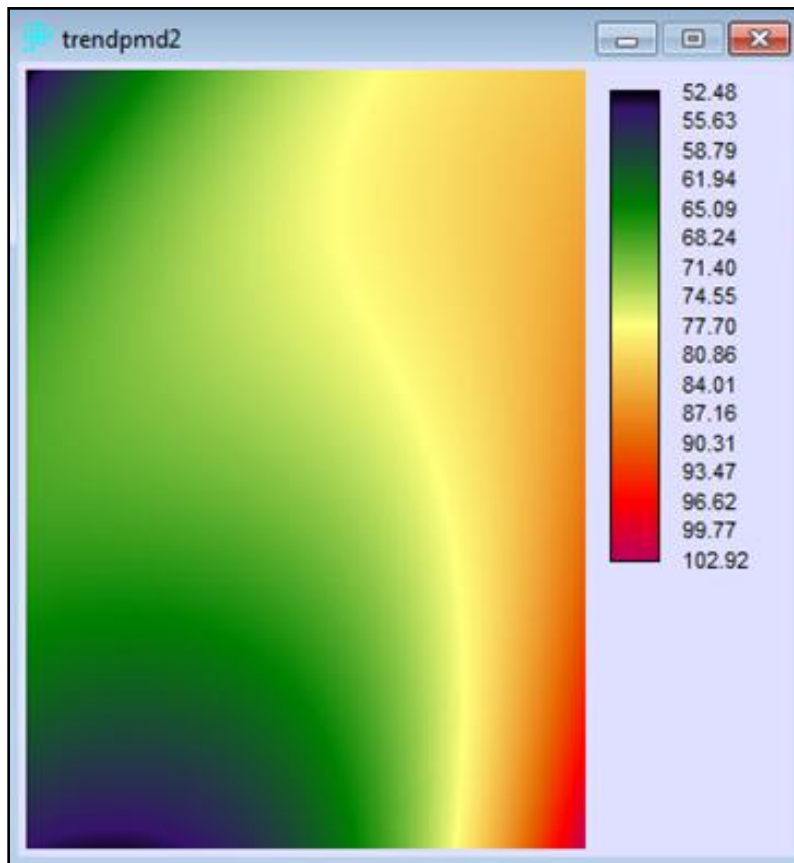


Figura 42: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años

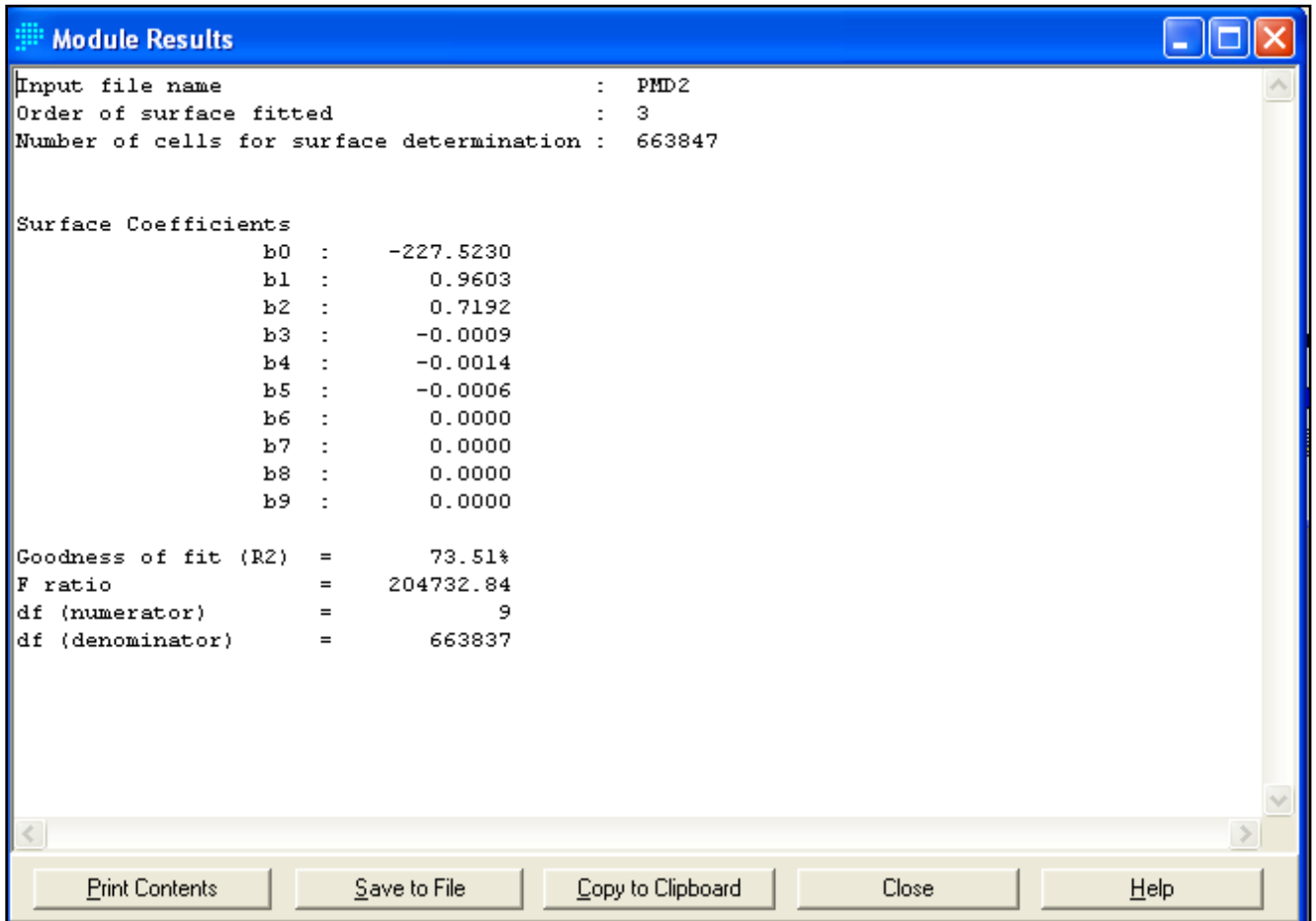


Figura 43: Archivo de salida del módulo “Trend”

3- Función “Overlay”. Mediante esta aplicación se busca llevar la imagen tendencial al límite de la región en interés, en nuestro caso la periferia formada por la provincia de Córdoba y Santa Fe. Esta función puede aparecer tanto en el menú GIS “Analysis - DatabaseQuery” como en el menú GIS “Analysis - Mathematical Operators”. La primera de las formas se muestra en la Figura 44. Y los pasos a seguir se muestran en la Figura 45.

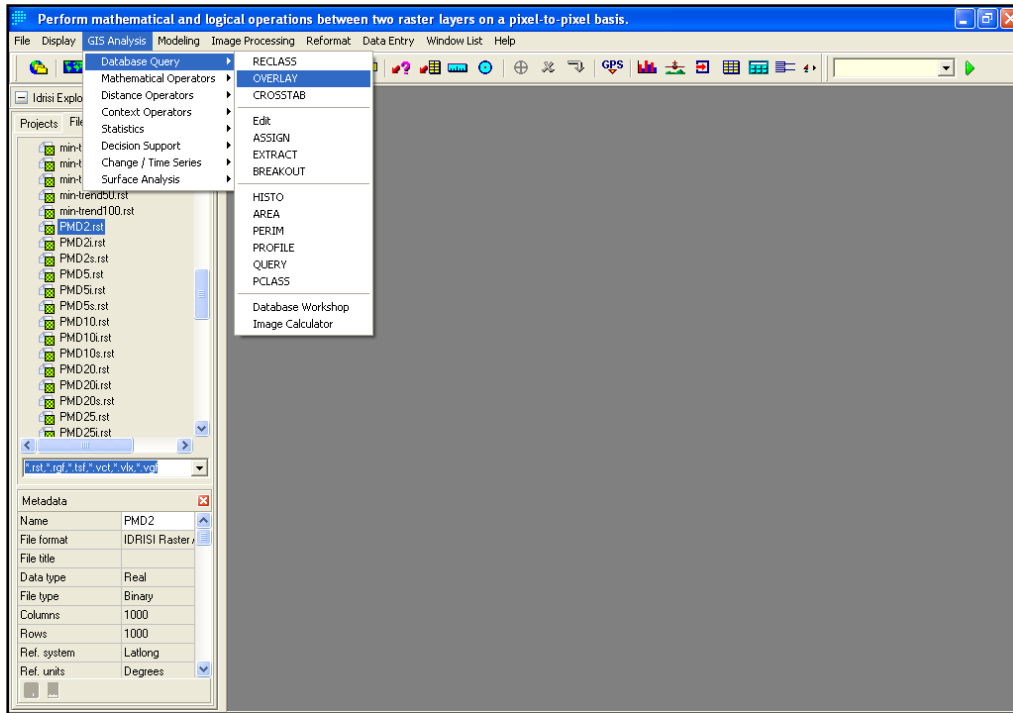


Figura 44: Secuencia para abrir la función “Overlay”

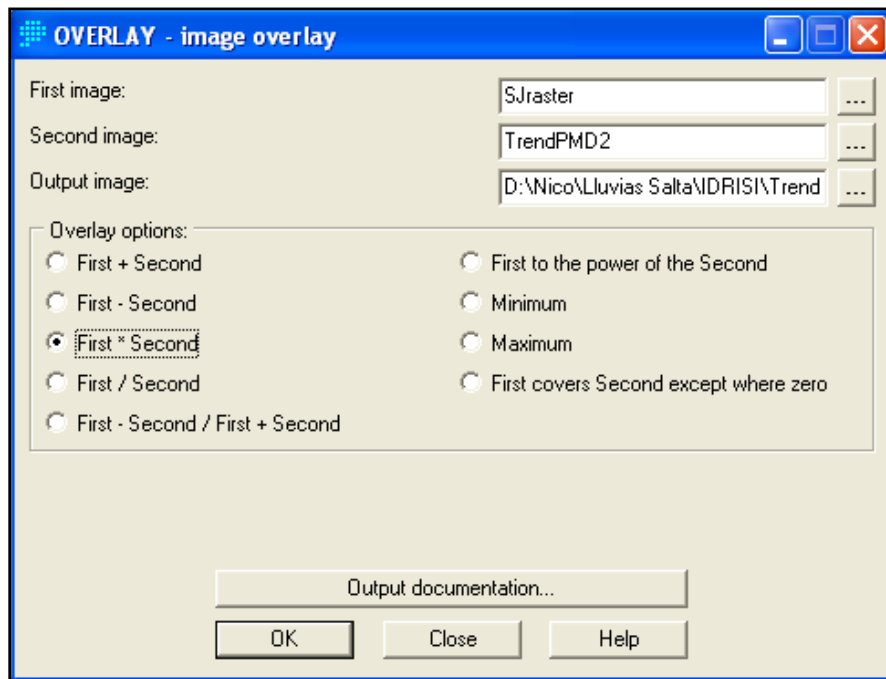


Figura 45: Cuadro de diálogo de la función Overlay

La operación de la Figura 49, se representa mediante el esquema siguiente (ver Figura 46):

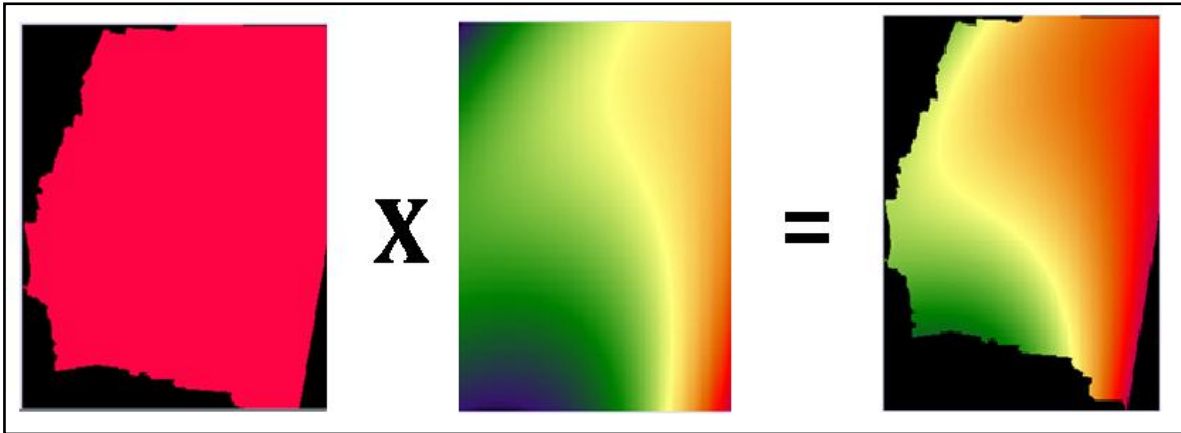


Figura 46: Esquema de la operación Overlay

La Figura 47 muestra un ejemplo de las superficies tendenciales para un periodo de retorno de 2 años.

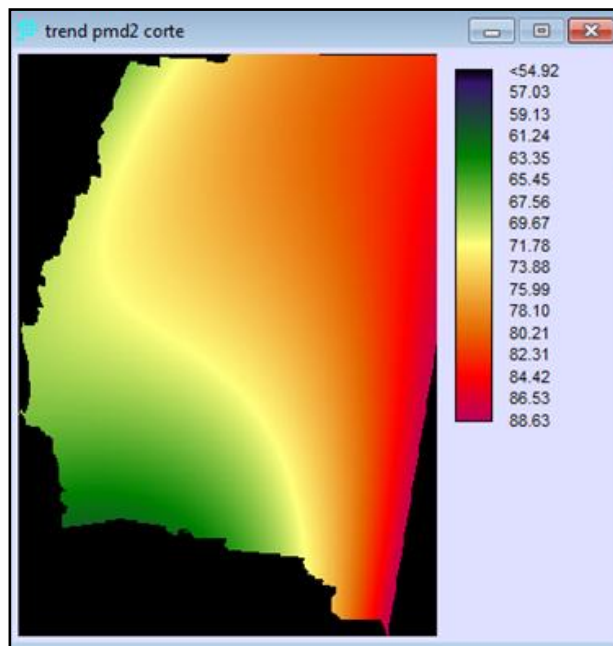


Figura 4748: Grilla interpolado por el método Trend. T = 2 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales

6.6.2. Histograma de frecuencias

Una vez obtenidas las interpolaciones por el método de Kriging para los valores superiores e inferiores de los intervalos de confianza de la lámina de lluvias máximas diarias anuales para distintas recurrencias y las tendencias de los valores medios, se debe verificar que los valores se encuentren comprendidos dentro del intervalo de confianza y si existen valores localizados fuera de él, el porcentaje sea muy pequeño en el fin de validar el uso del mapa tendencial.

- Valores dentro del intervalo de confianza:

Kriging mínimo - Trend medio $< 0 \Rightarrow$ Valores mínimos $<$ Valores medios

Kriging máximo - Trend medio $> 0 \Rightarrow$ Valores máximos $>$ Valores medios

Para visualizar esto, se representa en un esquema en la Figura 48, la curva que simboliza al *Trend Medio* queda entre las curvas que simbolizan el *kriging máximo* y *kriging mínimo*.

- Valores fuera del intervalo de confianza:

Kriging mínimo - Trend medio $> 0 \Rightarrow$ Valores mínimos $>$ Valores medios

Kriging máximo - Trend medio $< 0 \Rightarrow$ Valores máximos $<$ Valores medios

Se muestra también mediante esquemas estas dos opciones, la primera ecuación se representa en la Figura 49 y la segunda ecuación en la Figura 50

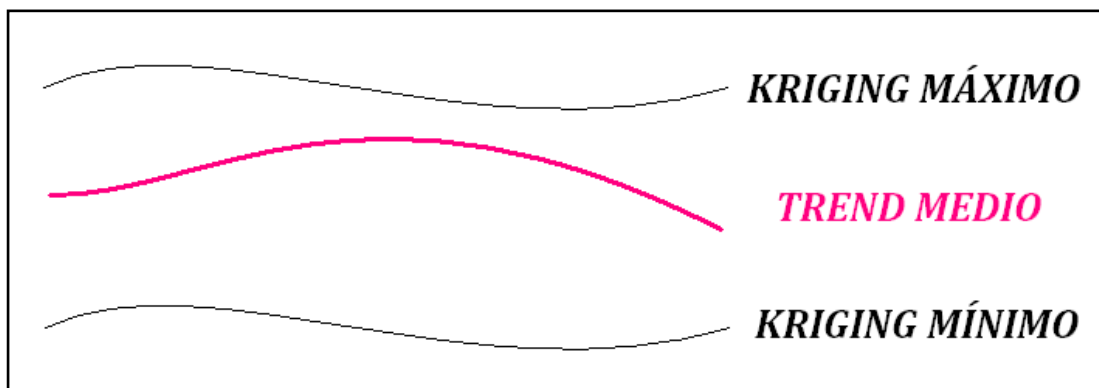


Figura 49: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan dentro del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)

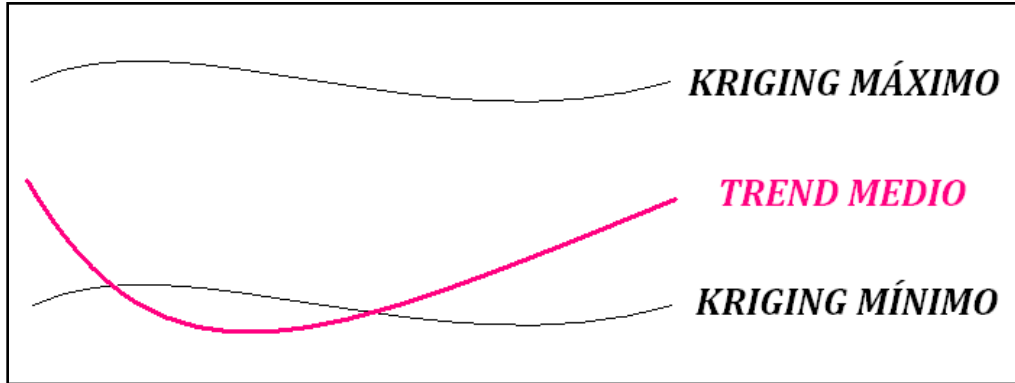


Figura 50: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)

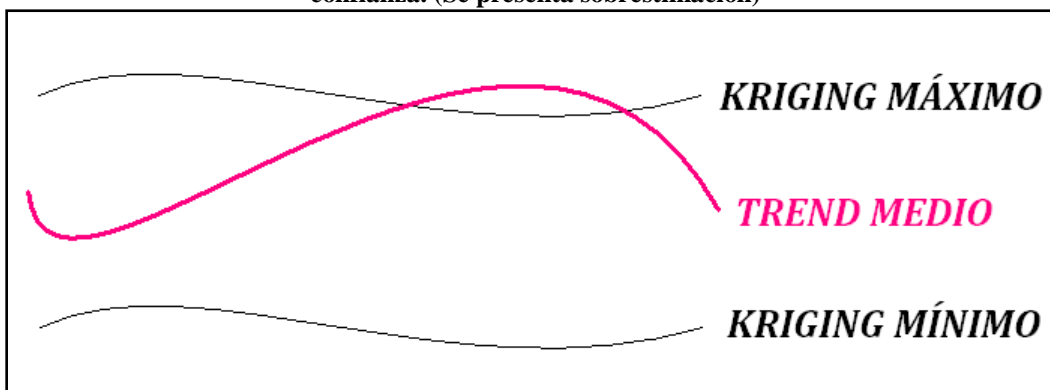


Figura 51: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)

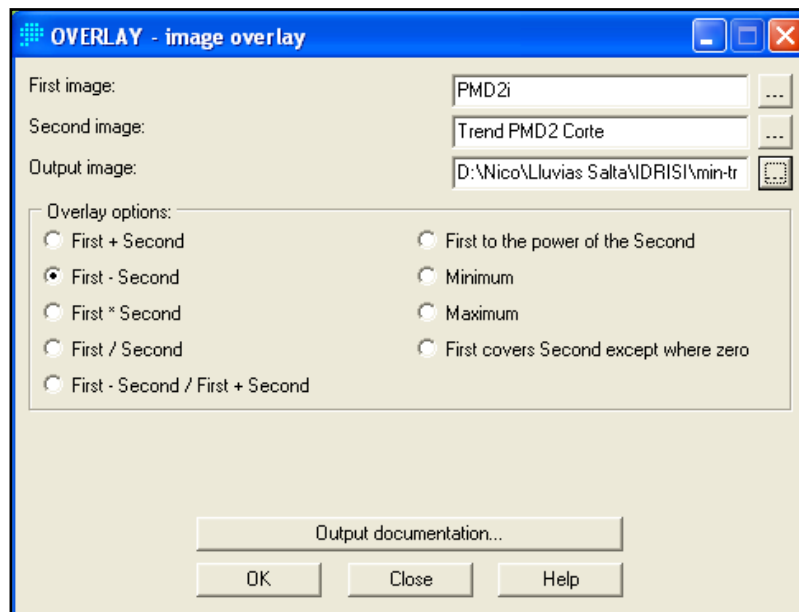


Figura 52: Cuadro de dialogo de la función Overlay

La diferencia entre las interpolaciones por el método de Kriging para los valores superiores e inferiores de los intervalos de confianza y las tendencias de los valores medios para regresiones lineal, cuadrática y cúbica, se lleva a cabo mediante la función Overlay, en el menú “GIS Analysis” seleccionando “Mathematical Operators” (Ver Figura 51). Se presenta a modo de ejemplo un archivo raster obtenido (Figura 52).

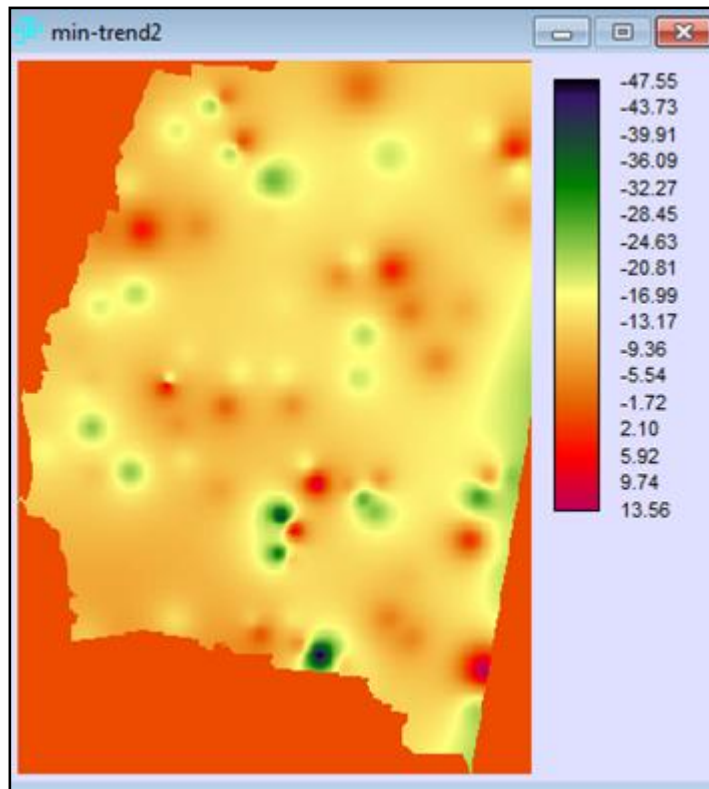


Figura 53: Diferencia entre “Kriging” (valores mínimos) y “Trend” (regresión lineal). T = 2 Años

Para poder visualizar la cantidad de valores que se encuentran fuera del intervalo de confianza se recurrirá a los histogramas de frecuencia. El módulo “Histo” ofrece un histograma de frecuencia de los valores de las celdas dentro de una imagen. Además, calcula la desviación promedio y estándar para toda la imagen y para el rango de datos especificado.

Esta herramienta acepta dos formas de producción: gráfica y numérica. Para el histograma gráfico hay varias opciones, incluyendo gráficos de líneas, barras y áreas, y opciones acumulativas y no acumulativas. La visualización numérica ofrece un resumen de las frecuencias de cada clase junto con frecuencias acumulativas y proporcionales. A partir de esto, puede determinarse con facilidad la mediana así como también cualquier otro rango

porcentual. Para ejecutar la función, desde el menú “GIS Analysis” seleccionar el submenú “Statistics” y elegir la opción “Histo” (Ver Figura 53).

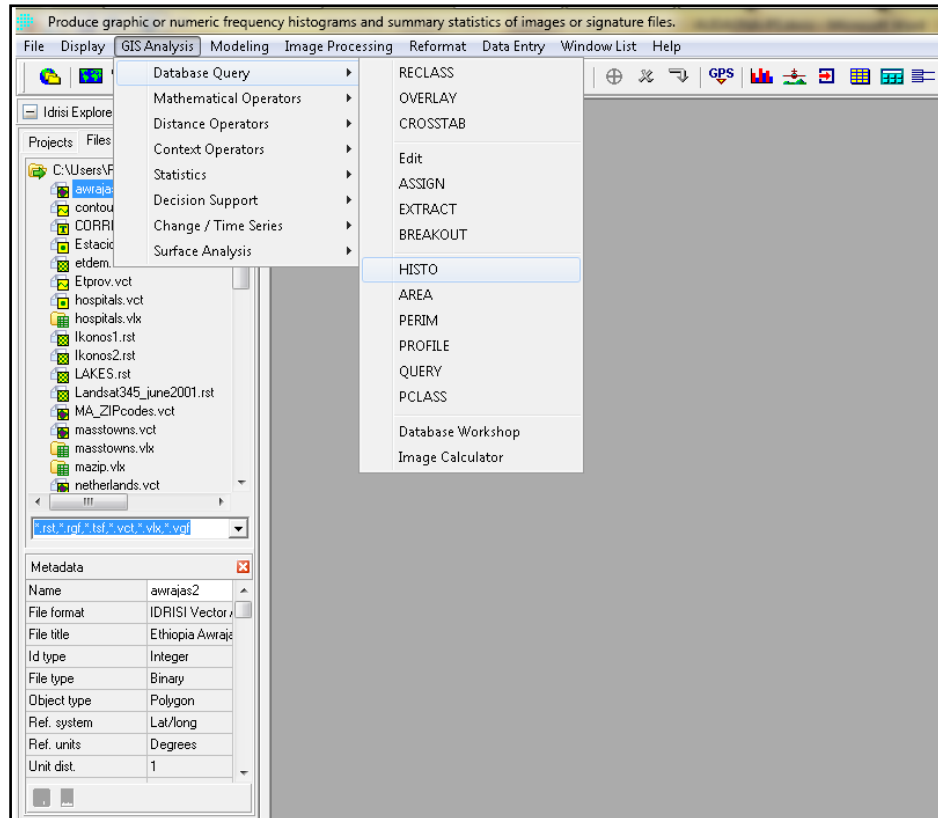


Figura 54: Secuencia para abrir la función Histo

El cuadro de diálogo de Figura 54 se deberá completar como se muestra. Se realizará un histograma para cada diferencia realizada entre las interpolaciones por el método de Kriging para los valores máximos y mínimos y las tendencias de los valores medios para regresiones lineal, cuadrática y cúbica. El ancho de clase y los valores mínimo y máximo quedan definidos automáticamente al abrir el archivo raster.

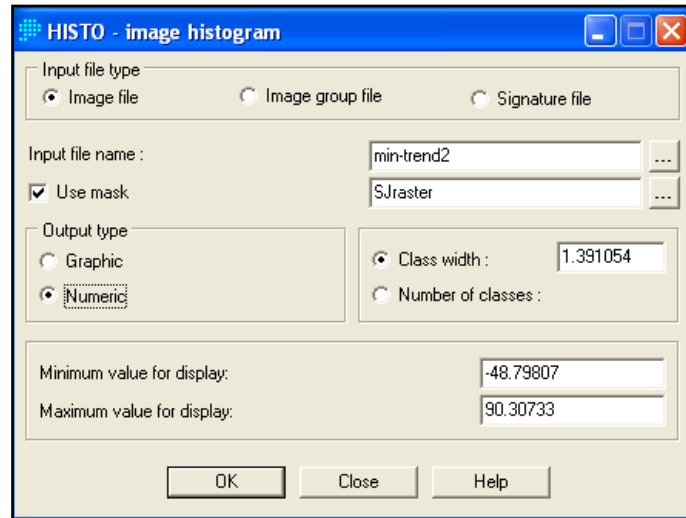


Figura 55: Cuadro de diálogo de la función Histo

Para cuantificar los valores fuera del intervalo de confianza, es fundamental obtener un histograma numérico, para ello es necesario utilizar una máscara, en nuestro caso 25km², de esta manera solo se obtendrán valores de histograma para la zona de interés obviando lo restante que lleva a un error en los resultados. El archivo de salida (Ver Figura 55) presenta siete columnas, ellas son: Clase, Límite Inferior, Límite Superior, Frecuencia, Proporción, Frecuencia Acumulada y Proporción Acumulada.

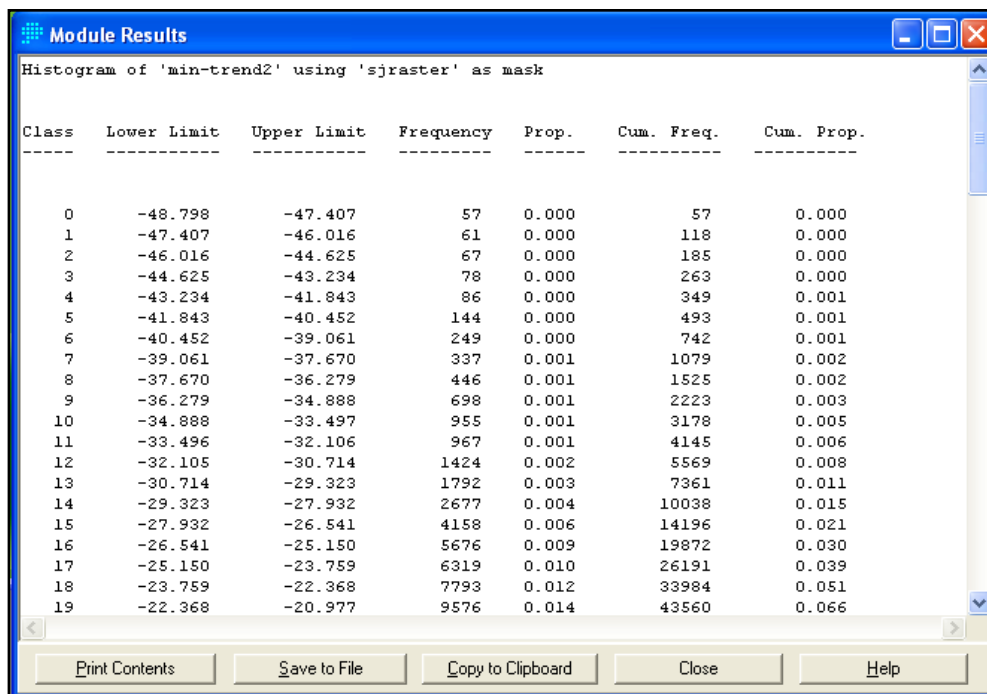


Figura 56: Histograma de frecuencias. Producción numérica

El histograma de frecuencias gráfico (Ver Figura 56) obtenido es:

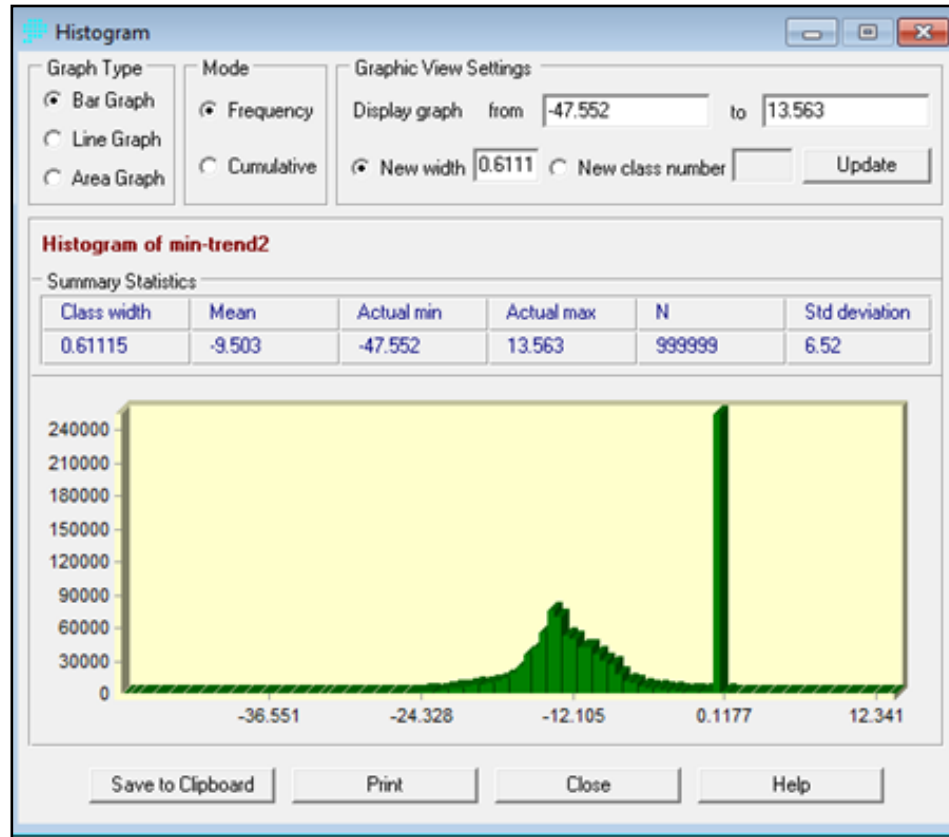


Figura 57: Histograma de frecuencias min-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica

Se observa que la mayoría de los valores son negativos, lo que responde a que la mayoría están dentro del intervalo min-trend, tan solo el 0,6% está fuera del mismo.

También en la Figura 57 observamos el histograma de frecuencias max-trend para un período de retorno de dos años, quedando la mayoría de los valores mayores a cero, indicando que están dentro del intervalo max-trend. El porcentaje fuera de este intervalo es de 0,6%.

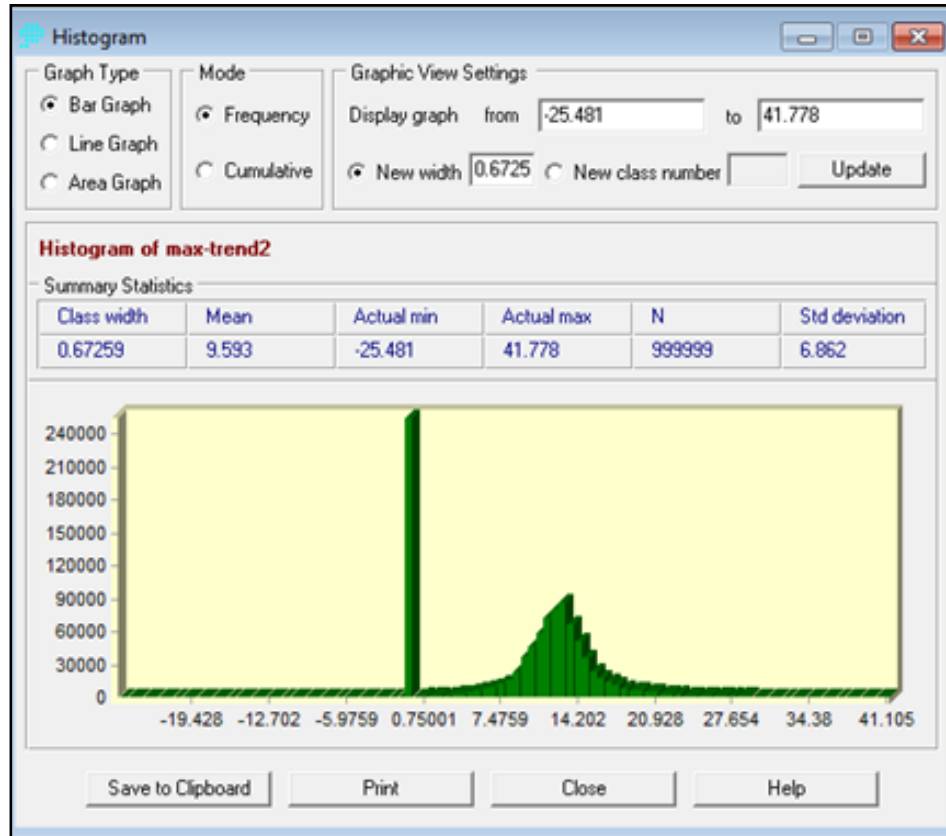


Figura 58: Histograma de frecuencias max-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica

En las dos figuras anteriores (56 y 57) se ve con claridad que en 0 aparece la mayor de las columnas; la gran cantidad de valores nulos corresponde a que cuando se realiza la operación de resta entre las dos imágenes (Mínima-Tendencia y Máximo-Tendencia), no sólo interviene Santiago del Estero, sino también todo el contorno alrededor, es decir, los valores correspondientes a la zona fuera de la máscara. De la Tabla 28 a la 34 se muestran los porcentajes de valores fuera del intervalo de confianza para las distintas recurrencias y tipos de regresión de la función "Trend".

	Cúbica
Máximo - Medio	0,6%
Mínimo - Medio	0,6%

Tabla 28: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 2 Años

	Cúbica
Máximo - Medio	0,4%
Mínimo - Medio	0,1%

Tabla 29: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 5 Años

	Cúbica
Máximo - Medio	0,3%
Mínimo - Medio	0%

Tabla 30: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 10 Años

	Cúbica
Máximo - Medio	0,3%

Tabla 31: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 20 Años

	Cúbica
Máximo - Medio	0,4%
Mínimo - Medio	0%

Tabla 32: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 25 Años

	Cúbica
Máximo - Medio	0,4%
Mínimo - Medio	0%

Tabla 33: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 50 Años

	Cúbica
Máximo - Medio	0,3%
Mínimo - Medio	0%

Tabla 34: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 100 Años

A medida que el periodo de retorno aumenta, es menor el porcentaje de puntos de la superficie tendencial que quedan fuera del intervalo de confianza, definido por las superficies inferior y superior (Kriging mínimo y Kriging máximo). Esto se ve en la Figura 58.

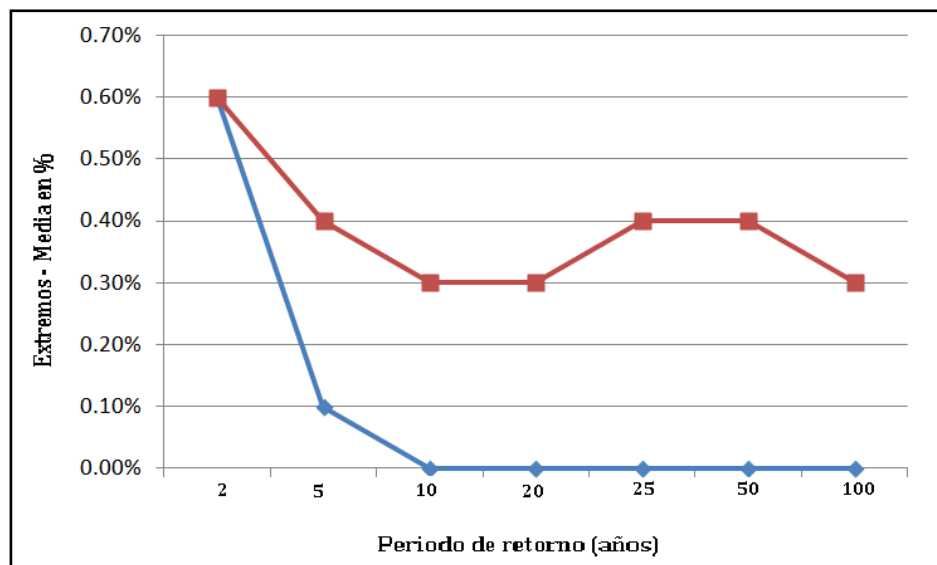


Figura 59: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos

6.7. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

Finalmente, como resultado de las operaciones realizadas en las secciones anteriores, llegamos al producto buscado. En las Figuras 59 a 64 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados para la provincia de Santiago del Estero.

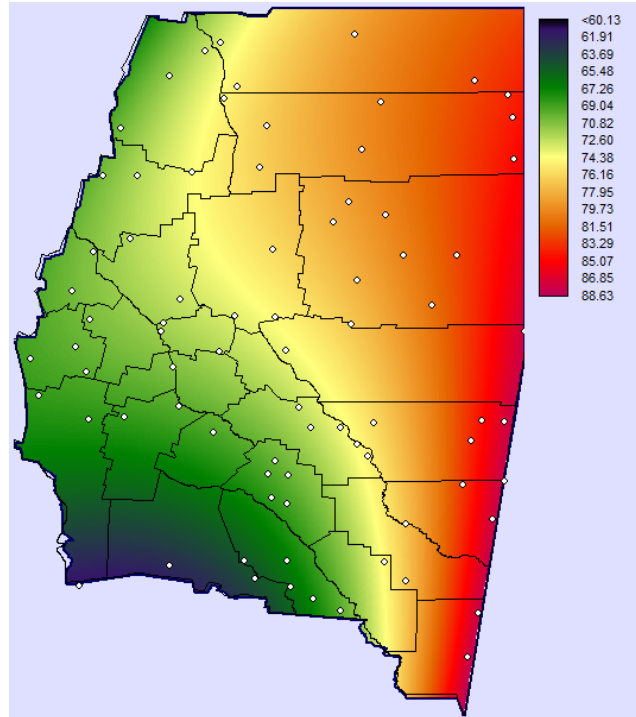


Figura 60: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 2 años [en mm]

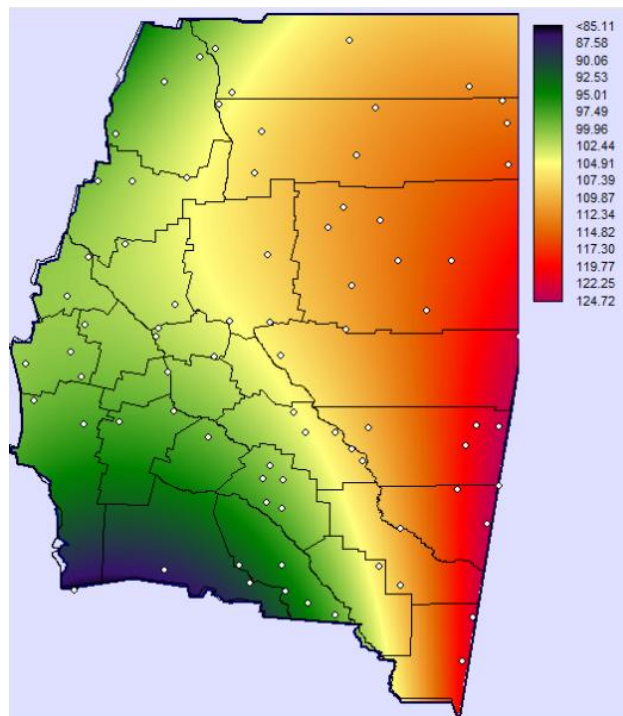


Figura 61: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 5 años [en mm]

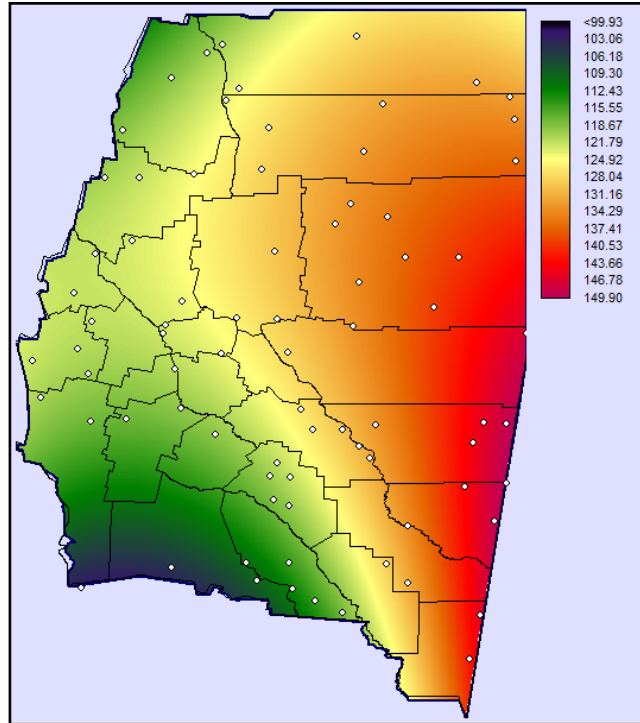


Figura 62: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 10$ años [en mm]

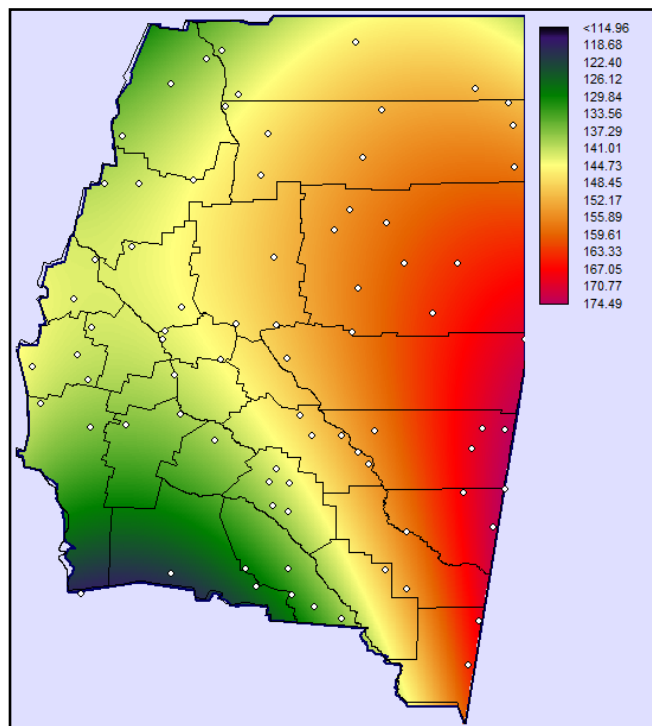


Figura 63: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno $T= 20$ años [en mm]

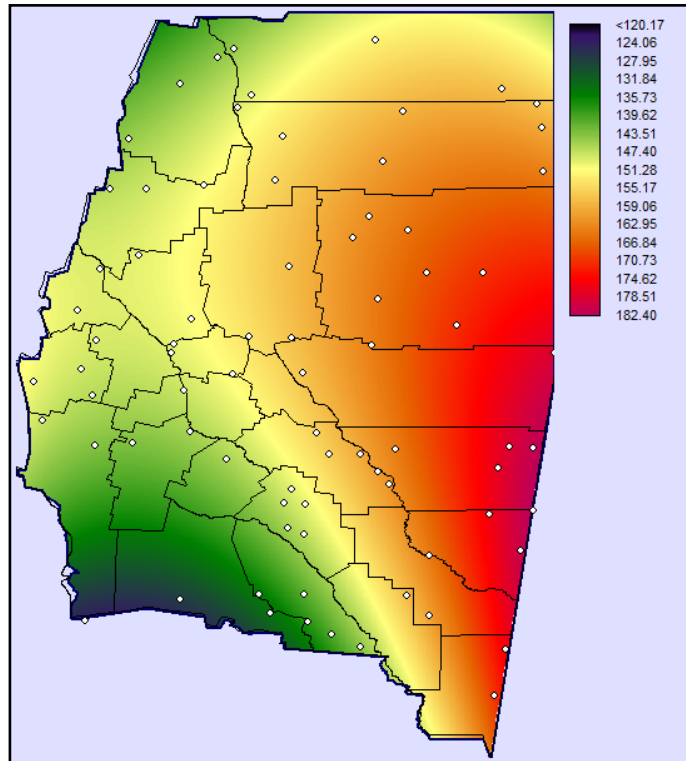


Figura 64: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 25 años [en mm]

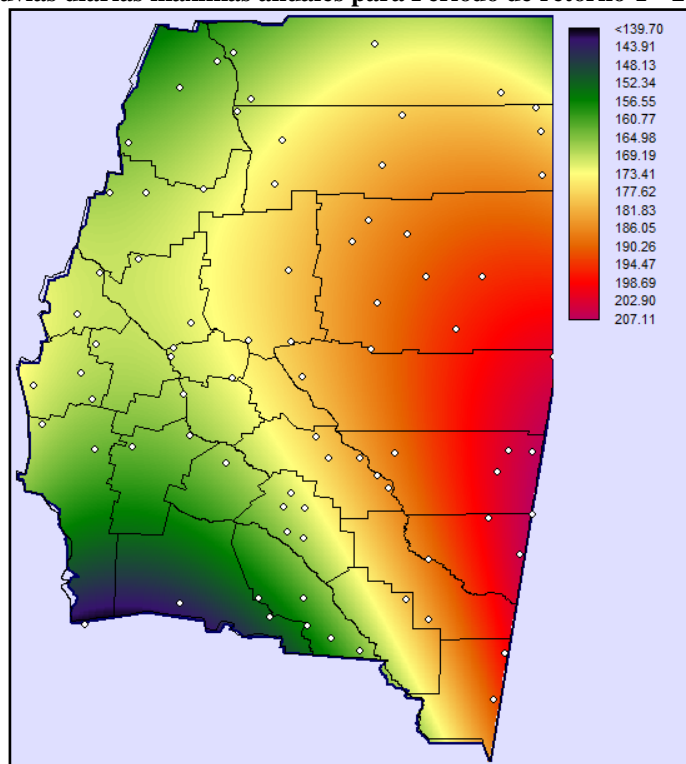


Figura 65: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 50 años [en mm]

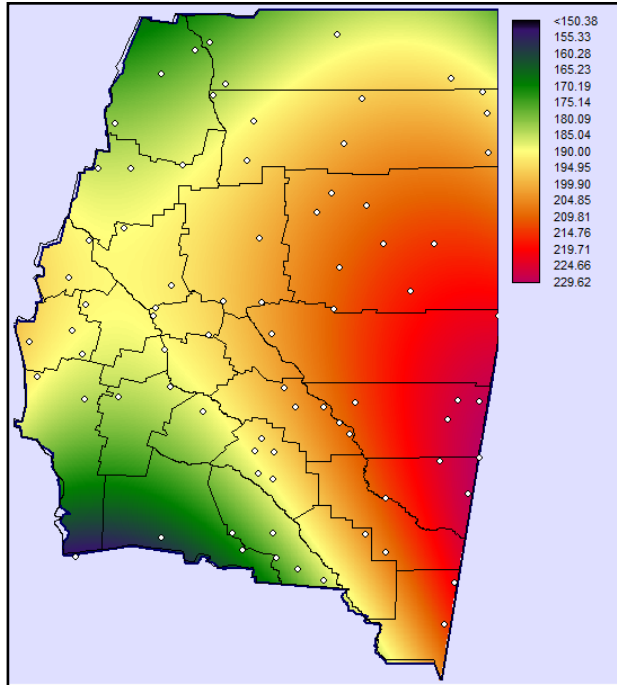


Figura 66: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para Periodo de retorno T= 100 años [en mm]

Capítulo 7

ANÁLISIS DE MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

7. ANÁLISIS DE MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

En el presente capítulo se analizarán los mapas y resultados obtenidos en el capítulo anterior.

7.1. COMPARACIÓN ENTRE MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO

Como se puede distinguir, según la escala de colores observada en los mapas del capítulo VI, se tienen tres zonas bien diferenciadas:

- Zona de mínimos: se ubica al suroeste de la provincia.
- Zona de medios: que se extiende al noroeste y oeste de la zona de estudio.
- Zona de máximos: ocupa el centro-este, sureste y parte del centro de Santiago del Estero.

Estas zonas se repiten para todos los periodos de retorno, con ciertas diferencias a medida que los mismos son mayores:

- Se modifican los límites, mínimos y máximos, de las PMD:

T= 5 años {<85.11; 124.72}

T= 10 años {<99.3; 149.9}

T= 20 años {<114.96; 174.5}

T= 25 años {<120.17; 182.4}

T= 50 años {<139.7; 207.11}

T= 100 años {<150.4; 229.6}

Como puede notarse, los límites aumentan, lo que resulta de utilizar la función de distribución Log normal, extrapolando los valores para periodos mayores de retorno.

- Distribución de la zona de mínimos, medios y máximos: a medida que aumenta el periodo de retorno, dicha distribución es prácticamente la misma, salvo en que ahora el valor medio no sólo ocupa la línea de división entre medios y máximos, sino que abarca la zona centro al noroeste y es más baja que antes, provocando que los valores medios ocupen la zona norte completamente.

Al comparar estas tendencias con las observadas en los mapas de isohietas de precipitaciones totales anuales (PMA) de la provincia de Santiago del Estero (Figura 59 y Figura 65) se puede decir que existe una disminución de precipitaciones en sentido este - oeste.

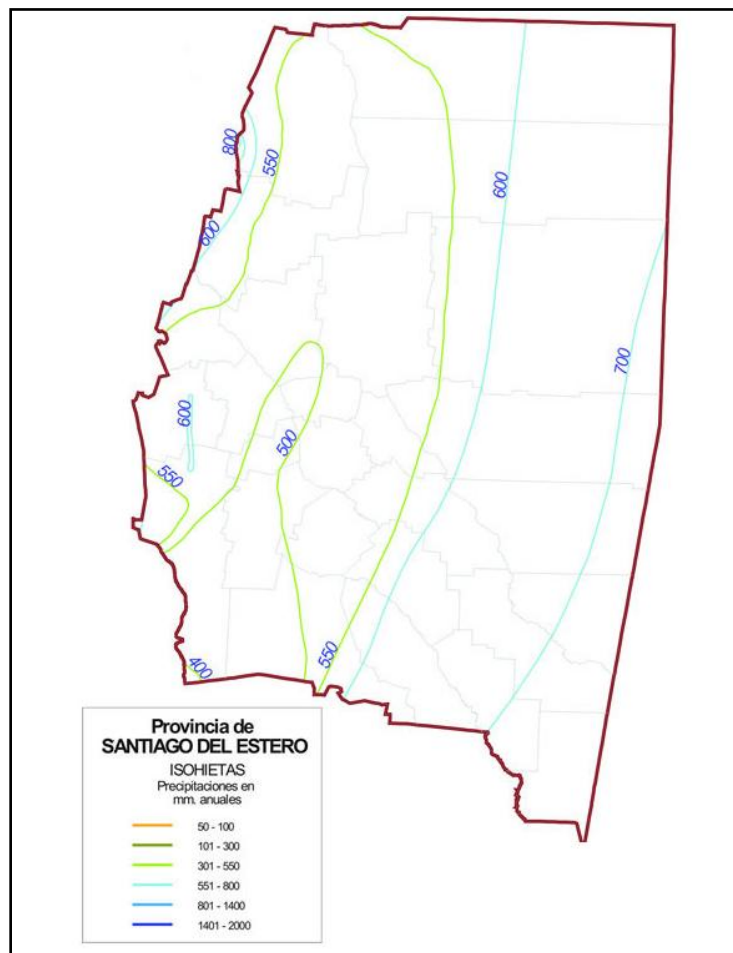


Figura 67: Mapa de isohietas anuales de la provincia de Santiago del Estero

7.2. EVALUACIÓN DE LAS DIFERENCIAS OBSERVADAS ENTRE LA INFORMACIÓN REGIONALIZADA Y LA INFORMACIÓN LOCAL

En esta sección, se seleccionan un total de 10 estaciones, elegidas de manera aleatoria, para evaluar las diferencias observadas entre la información regionalizada y la información local comparando el valor de las laminas de lluvia diaria estimadas para para periodos de retorno $T=2$ y 100 años en cada localización donde se contaban con registros pluviométricos , y los valores que se obtienen de la superficie tendencial comprobando así, los efectos de adoptar una superficie tendencial.

En lo que sigue, se muestran las tablas (35 y 36) y los mapas correspondientes (Figuras 59 y 65), con los resultados obtenidos:

Código	Nombre de la Estacion	Longitud de serie [años]	PMD 2i [mm]	PMD2 (Log N) [mm]	PMD 2S [mm]	PMD 2 (Tenden) [mm]
285	El Oso	17	71.426	86.59	101.76	77.07
294	El Porvenir	21	60.13	72.51	84.85	80.19
302	Clodomira	27	58.18	67.14	76.09	72.39
308	Monte Quemado	24	75.82	86.12	96.43	78.63
316	Villa La Punta	27	56.68	66.13	75.59	69.27
326	El Arenal	21	66	84.03	102.42	72.02
340	Tintina	24	83.86	93.97	104.07	77.55
344	Ojo de Agua	24	63.83	73.03	82.22	72.02
359	Termas	27	59	69.21	79.29	66.48
371	Añatuya	27	69	82.3	95.55	77.55

Tabla 35: Comparación entre los valores locales de láminas de lluvia diaria y la superficie tendencial, para $T=2$ años

Código	Nombre de la Estacion	Longitud de serie [años]	PMD 100i [mm]	PMD100 (logN) [mm]	PMD 100S [mm]	PMD 100 (Tenden) [mm]
285	El Oso	17	133.68	204.04	274.39	186.56
294	El Porvenir	21	122.09	183.49	244.89	200.91
302	Clodomira	27	113.05	152.86	192.67	186.56
308	Monte Quemado	24	132.29	172.72	213.14	200.91
316	Villa La Punta	27	115.13	159.7	204.26	172.21
326	El Arenal	21	157.8	276.43	395.07	200.91
340	Tintina	24	138.68	175.62	212.56	200.91
344	Ojo de Agua	24	114.46	151.85	189.24	157.86
359	Termas	27	121.65	170.01	218.38	186.56
371	Añatuya	27	152.32	222.16	292	215.27

Tabla 36: Comparación entre los valores de la distribución Log normal y la superficie tendencial, para $T=100$ años

Como puede observarse, todos los valores de las columnas “PMD 100 (Tenden)”, se encuentran dentro del intervalo de confianza determinado por los valores mínimo y máximo en cada una de las estaciones y se aproximan al valor estimado; no obstante , vale aclarar que

para un $T=2$ años, uno de los valores de la columna "PMD 2 (Tenden)", no se encuentra dentro del intervalo y esto se debe a que cuanto menor es el periodo de retorno, mas chico es el intervalo de confianza y hay más probabilidad de que alguno de los datos quede afuera del mismo.

Con esto se verifica una vez más, que existe el 95% de probabilidad de que los valores se encuentren dentro de dicho intervalo.

Por último, se puede concluir en que cuanto mayor es la longitud de la serie, mayor va a ser la aproximación entre el valor local estimado con la distribución Log normal y el de la superficie tendencial, ya que en estos casos se tendrá un intervalo de confianza más pequeño, y por ende menos incertidumbre.

Capítulo 8

CONCLUSIÓN

8. CONCLUSIÓN

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 estaciones pluviométricas en la región de estudio (Santiago del Estero).
2. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas.
3. 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.
4. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva 17.00.
5. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de importantes fluctuaciones en el espacio.
6. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.
7. Análisis de los resultados obtenidos a partir del contraste de las tendencias observadas de lámina de lluvia diaria para distintos T y las isohietas anuales: se observaron patrones similares. Además se evaluaron las diferencias observadas entre la información regionalizada y la información local, validando de esta forma el uso los mapas tendenciales.

8.2. CONCLUSIONES PERSONALES

Como conclusión de esta actividad, se puede decir que se ha trabajado en un grupo donde prima el trabajo en equipo, en el que todos están dispuestos a enseñar y ayudar. A lo largo del desarrollo se fueron incorporando diferentes técnicas y actividades, algunas desconocidas, que han sido de gran interés y utilidad para la concreción de los objetivos planteados.

8.3. TRABAJOS FUTUROS

Se conforma una segunda etapa, a realizar hasta Julio de 2014, en donde se busca recopilar nueva información para así poder densificar y ampliar la zona de estudio, incluyendo las provincias de Formosa y Chaco. Completando así la región norte del País.

Al proceso de análisis se le sumará la estimación de la Precipitación Máxima Probable y se realizará una comparación de los resultados con las nuevas condiciones de borde con respecto a los obtenidos en este trabajo. También se creará una plataforma web para poder acceder a toda la información generada.

Capítulo 9

REFERENCIAS

9. REFERENCIAS

- Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio (2012). “Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las provincias de Córdoba y Santa Fe” - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.
- Camaño Nelli; Maria Clarita Dasso (2003). “Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias”.
- Carlos G. Catalini, Andrea Maidah, Carlos M. García y Gabriel Caamaño Nelli (2010). “Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba”
- Carlos G. Catalini, Gabriel E. Caamaño Nelli, Carlos M. García Rodríguez, Virginia Belli, Bernabé Bianchiotti, Agustín Cueto, Gastón Lériada, Daniela Lovera, Germán Pinasco, Ezequiel Sánchez, Martín Miguez Ruiz (2012). “REGIONALIZACIÓN PARAMETRICA DE FUNCIONES I-D-T. APLICACIÓN A LAS PROVINCIAS DE CÓRDOBA Y SANTA FE”
- Lecinas, Matías Javier (2014). “Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización” - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.