

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**



**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

**Centro de Estudios y Tecnología del Agua**

**PRACTICA SUPERVISADA**

**Ingeniería Civil**

**“REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS  
DIARIAS  
EN LAS PROVINCIAS DE CHUBUT, SAN JUAN,  
SANTA CRUZ Y TIERRA DEL FUEGO”**

**Autor:** BERETTA, Tomás.

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

**Supervisor Externo:** MSc. Ing. GUILLÉN, Nicolás Federico. Ing. BARAQUET, María a  
Magdalena

**AÑO 2018**

## AGRADECIMIENTOS

❖ A mis padres Guillermo y Amalia, por estar siempre presentes sirviéndome de apoyo total para haber podido llevar esta carrera adelante.

❖ A mis amigos, que son los que están en forma incondicional, con los que se comparten los buenos momentos, pero así también, brindan su apoyo en los momentos difíciles y no te dejan bajar los brazos.

❖ Al Ing. Nicolás G., supervisor externo, y a la Ing. Magdalena B. quienes me guiaron a lo largo de este trabajo, y me enseñaron a poner en práctica conceptos adoptados en la facultad y a su paciencia para lograr obtener los resultados de este trabajo final.

❖ Al Dr. Ing. Carlos García, por darme la oportunidad de participar y formar parte de este proyecto, el cual me permitió adquirir conocimientos para la vida profesional.

❖ A los docentes que me acompañaron durante mi formación, brindándome sus conocimientos y preparándome para ser un buen profesional.

# TÍTULO: REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LAS PROVINCIAS DE CHUBUT, SAN JUAN, SANTA CRUZ Y TIERRA DEL FUEGO.

**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 las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego. Teniendo en cuenta que, para predecir esta lámina de lluvia para distintas duraciones, se necesitan registros continuos que se obtienen con *pluviografía*, y que los mismos son escasos espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información *pluviométrica* habitualmente disponible. Esta información de lámina de lluvia precipitada diaria es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización del valor de la lámina de lluvia diaria estimada para distintas probabilidades de excedencia, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

En primer lugar, se seleccionaron registros de un conjunto de estaciones pluviométricas. A partir de esta información se elaboraron las series históricas de máximos diarios anuales. Luego se verificó que las series elaboradas cumplan las hipótesis estadísticas básicas requeridas para hacer un análisis de estadística inferencial (presencia de datos atípicos, independencia, estacionariedad y homogeneidad). Luego se realizaron 6 ajustes de funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lámina de lluvia para los siguientes periodos de retorno,  $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$  y  $100$  años, como así también los valores de los intervalos de confianza. Se seleccionó la función de distribución *LogNormal* como óptima para este estudio y se estimaron los valores de lámina de lluvia máxima diaria para distintas probabilidades de excedencia. Dichos valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron para las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego, mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de  $25 \text{ [km}^2\text{]}$ . Finalmente, se acoplarán los datos de las provincias analizadas en este trabajo con las demás previamente desarrolladas siguiendo la misma metodología para ir conformando el mapa nacional de precipitaciones máximas diarias asociadas a diferentes recurrencias.

## INDICE DE TEMAS:

1. MARCO REFERENCIAL.....	5
1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1.1. Antecedentes de estudios sobre lluvias máximas diarias para diseño hidrológico en Argentina.....	6
1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROVINCIAS ANALIZADAS EN ESTE ESTUDIO.....	8
1.2.1. Provincia de Chubut.....	8
1.2.2. Provincia de San Juan.....	10
1.2.3. Provincia de Santa Cruz .....	12
1.2.4. Provincia de Tierra del Fuego .....	13
1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	14
1.3.1. Objetivo General.....	14
1.3.2. Objetivos Particulares.....	14
1.4. METODOLOGÍA.....	14
2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.....	16
2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	16
2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS. .	17
2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie. ....	18
2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).....	18
2.2.3. Prueba de Estacionariedad (Kendall).....	20
2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).....	21
2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	22
2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.....	22
2.3.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad.....	23

2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.....	25
3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA. ....	27
3.1. Recopilación de la información meteorológica histórica. ....	27
3.2. Localización espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas. ....	27
3.3. Selección de estaciones pluviométricas. ....	31
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA.....	33
4.1. Descripción de los registros a analizar.....	38
4.2. Análisis de estadística descriptiva.....	40
4.3. Verificación de hipótesis estadísticas en las series de máximos hidrológicos. ....	41
4.3.1. Detección de datos atípicos.....	41
4.3.2. Prueba de Independencia.....	43
4.3.3. Prueba de Estacionariedad. ....	43
4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual. ....	44
4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	44
4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad. ....	44
4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste. ....	46
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS. ....	48
5.1. Verificación de hipótesis estadísticas en las series de lluvias máximas. ....	48
5.1.1. Detección de presencia de Datos Atípicos. ....	48
5.1.2. Prueba de Independencia.....	48
5.1.3. Prueba de Estacionariedad.....	49
5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual. ....	49
5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log Normal. ....	49

5.2. analisis de estadística descriptiva.....	54
5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	55
6. REGIONALIZACION.....	57
6.1. Introduccion.....	57
6.2. Creacion de una base de datos.....	57
6.3. Creacion de archivo vectorial y de valores .....	58
6.4. Generacion de una mascara para delimitar la zona de interpolacion.....	62
6.5. Metodo de interpolacion de kriging .....	65
6.6. Mapas tendenciales de lluvias diarias maximas anuales para distintos periodos de retorno. .....	69
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	76
7.1. Introducción.....	76
7.2. Contraste entre los mapas obtenidos y mapas de isohietas medias anuales existentes en las provincias de estudio .....	76
7.2.1. Antecedentes .....	76
7.2.2. Comparacion entre mapas obtenidos en este trabajo y mapas de isohietas de las provincias de estudio.....	79
7.3. Comparación entre resultados obtenidos con la metodología propia y el mapa de isohietas de precipitación total media anual en la republica argentina provisto por el inta. ....	81
8. CONCLUSIONES.....	84
8.1. Conclusiones del trabajo.....	84
8.2. Conclusiones personales.....	85
8.3. Trabajos futuros.....	86
bibliografía y referencias.....	87

## 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 estacionalidad del fenómeno, y usando datos históricos, con una longitud de serie suficiente. Con esto se asegura que una muestra sea larga y representativa, con lo que se tendrá menos incertidumbre.

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



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

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

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

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

Maidah (2010) retomó el trabajo de García (1994) y bajo el título de “Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al Estudio de Lluvias Diarias”, desarrolló una herramienta técnica actualizada de similares características a la desarrollada en el trabajo de origen, con la ventaja de obtener en forma rápida y expeditiva, mediante las coordenadas geográficas de un punto de interés, las máximas precipitaciones diarias con recurrencia asociada. Los resultados de este trabajo incluyen los valores mínimos, medios y máximos (definidos por los intervalos de confianza) de los valores predichos de la lámina de lluvia máxima diaria para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 100 y 200

años en cualquier punto de la provincia de Córdoba a un nivel de significancia del 95%. Empleando un Sistema de Información Geográfica (SIG), a través del programa IDRISI Andes, Maidah (2010) presentó raster de isohietas con recurrencias asociadas a partir de información de base que comprendió el periodo 1941-1996, así como un resumen de las principales características del SIG empleado.

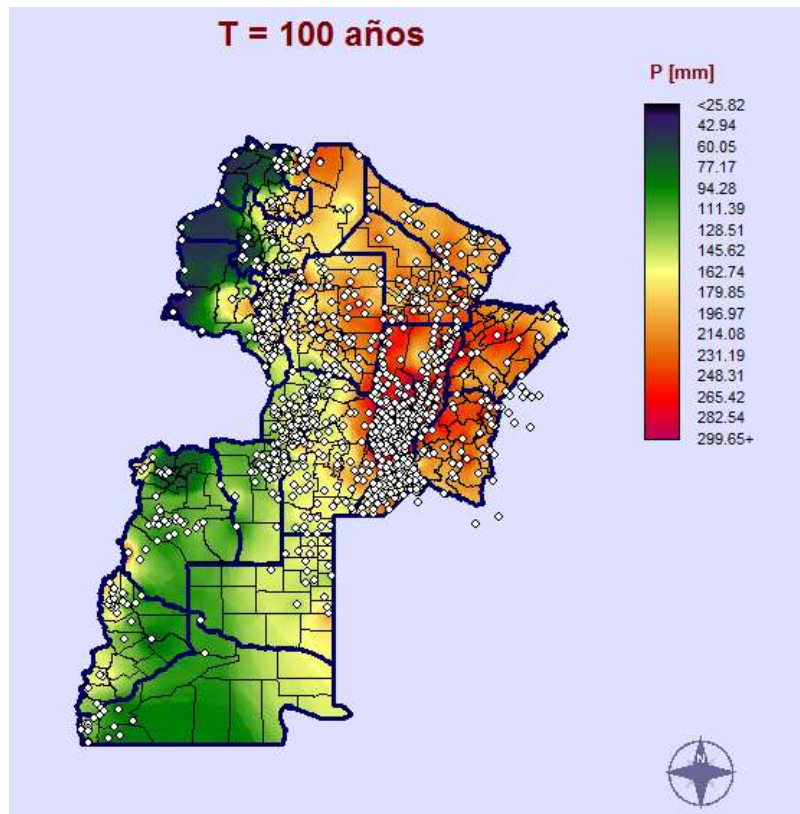
Lérida y Sánchez (2011), elaboraron un estudio Metodológico para la determinación de una Grilla i-d-T consistente en la provincia de Córdoba. Este trabajo continuó los lineamientos de Maidah (2009) implementando el Modelo predictor DIT (Caamaño et al., 2003) en toda la provincia de Córdoba, regionalizando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

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

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

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

Entre los años 2014 y 2015, Guillén continuó aplicando la misma metodología (la de la provincia de Córdoba) en las provincias de Salta, Jujuy, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco y Formosa. En dicho trabajo finalmente se agruparon 885 estaciones en base a las cuales se realizaron los mapas de lluvia. En el año 2016, Aldonza y Bonaterra realizaron un trabajo análogo para las provincias de Entre Ríos y Corrientes. En el año 2017, Piazzoni continuó con la regionalización de lluvias máximas diarias de las provincias de Neuquén y Río Negro y, por último, en el año 2018 Fuentes acopló las provincias de Mendoza y La Pampa. En la Figura 1 se presenta el mapa de lluvias máximas diarias asociada a un tiempo de retorno de 100 años tal cual se encontraba previamente al desarrollo de este trabajo.



**Figura 1: Antecedentes de provincias analizadas sin Neuquén y Río Negro para una recurrencia de T=100**

## **1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROVINCIAS ANALIZADAS EN ESTE ESTUDIO**

### **1.2.1. Provincia de Chubut**

Chubut es una provincia argentina ubicada al sur del país, en la Región Patagónica (Argentina) o Patagonia, entre los paralelos 42 y 46 de latitud sur, limita al norte con las provincias de Río Negro, al este con el Mar Argentino, al sur con Santa Cruz y al oeste con la República de Chile. Tiene 15 departamentos, su capital es Rawson, y la ciudad más populosa es Comodoro Rivadavia. Tiene 428.046 habitantes. Con sus 224.686 km<sup>2</sup>, es la tercera provincia más grande del país, sólo superada por las provincias de Buenos Aires y Santa Cruz.

Respecto al relieve presenta dos tipos: mesetas y montañas. La región llamada Meseta Patagónica se extiende desde los Andes en el oeste, hasta el Mar Argentino en el este, conformando el sistema de los patagónides. El relieve asciende progresivamente, desde el mar a la cordillera en mesetas, terrazas o pampas patagónicas. Son tierras áridas, casi totalmente desprovistas de vegetación. El relieve montañoso está ubicado en la parte occidental de las provincias y es el último tramo de la cordillera de los Andes. Por la influencia de los vientos húmedos del Pacífico, esta zona posee una vegetación muy frondosa compuesta por coníferas y hayas. En la Figura 2 y en la Figura 3 pueden observarse los mapas político y físico de esta provincia.



**Figura 2: Mapa Político de la provincia de Chubut (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)**

El clima de Chubut es frío y húmedo en la zona occidental o andina, descendiendo las temperaturas hacia el sur. El centro de la provincia es predominantemente árido y de grandes amplitudes térmicas con una zona de oasis dada por los lagos Colhué Huapi y Musters, allí se encuentra la ciudad de Sarmiento, en la cual se han registrado algunas de las temperaturas más bajas de la Argentina Continental durante el siglo XX: en julio de 1950 34 °C bajo cero, mientras que más al este, en el valle inferior del río Chubut y en la costa el clima se mantiene aún bastante seco si bien beneficiado por la humedad proveniente del Mar Argentino y la acción moderadora térmica del influjo oceánico.

Las precipitaciones se concentran en los meses invernales, acordes con la ubicación del anticiclón del Pacífico Sur; y son más copiosas en la línea de las mayores elevaciones, razón por la cual la cantidad es menor al sur del río Pico, ya que dichas alturas allí se encuentran en el lado chileno. La existencia de abundantes lagos demuestra las numerosas lluvias recibidas. El resto de las alturas andinas, al oriente de las altas cumbres, recibe un caudal de precipitaciones que va decreciendo con rapidez de oeste a este.



**Figura 3: Mapa Físico de la provincia de Chubut (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)**

Una vez que se ingresa a las mesetas las escasas precipitaciones (entre 100 y 200 mm anuales) se distribuyen a lo largo del año con un aumento en otoño e invierno, estación en que caen en forma de nieve.

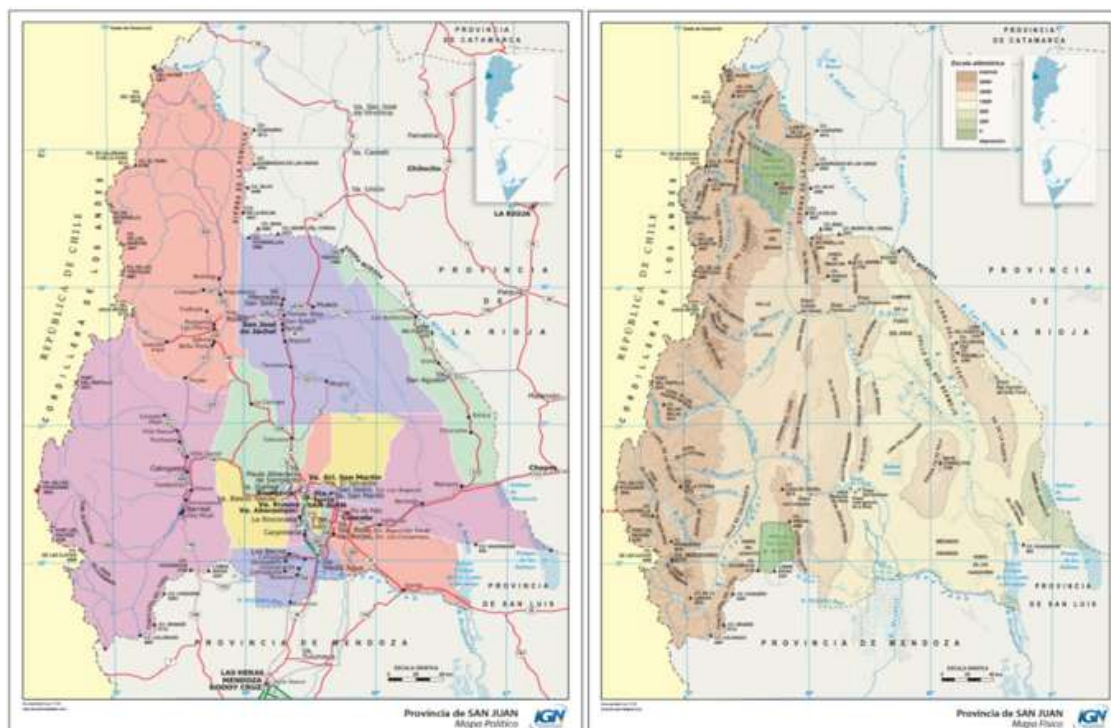
A Chubut llegan fuertes vientos occidentales. Las elevaciones andinas son un obstáculo para los húmedos vientos del oeste que, obligados a elevarse, descargan en ellas intensas lluvias y nevadas invernales. Una vez sorteadas dichas alturas, los vientos descienden hacia el este convirtiéndose en vientos secos y de gran velocidad.

### 1.2.2. Provincia de San Juan

San Juan es una de las 23 provincias que integran la República Argentina. A su vez, es uno de los 24 estados autogobernados que conforman el país y uno de los 24 distritos electorales legislativos nacionales. Su capital y ciudad más poblada es la homónima San Juan. Está ubicada al noroeste de la región del Nuevo Cuyo, al oeste del país, limitando al noreste con La Rioja, al sureste con San Luis, al sur con Mendoza y al oeste con la República de Chile, cuyo límite está determinado por la divisoria de agua de la cordillera de los Andes.

El territorio de esta provincia posee 89 651 km<sup>2</sup>, en donde prima un relieve montañoso intercalado por valles y travesías bajo un clima, predominante, templado seco, con una marcada escasez de cursos hídricos superficiales. En los valles se desarrollan los oasis, producto del embalsamiento y sistematización de los ríos generados por el deshielo cordillerano. En dichos espacios es donde se concentra la población, que para 2010 rondó los 681 055 habitantes. Entre ellos se destaca el oasis del Tulum, en donde se emplaza

el Gran San Juan, núcleo urbano que concentra más del 60 % de la población total de la provincia. En la Figura 4 pueden observarse los mapas político y físico de esta provincia.



**Figura 4: Izquierda: Mapa Político de la provincia de San Juan – Derecha: Mapa Físico de la provincia de San Juan (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)**

San Juan posee un clima con una elevada continentalidad, es decir que no posee influencia oceánica, es seco, de escasas precipitaciones. El clima influye en los sistemas de modelado, en los regímenes fluviales, en los tipos de suelos y en las formaciones vegetales. Por ejemplo, las precipitaciones de tipo nívea se dan a las alta montaña y líquida en resto del territorio, con una importante amplitud térmica, anual y diaria, siendo la misma la más elevada de la Argentina.

Una particularidad de la provincia es la presencia de un viento local, el Zonda. Un viento muy cálido y seco que sopla desde el oeste, es cálido y seco debido al "efecto Föhn" extremado por adiabasis- que sufre al atravesar las elevadas cordilleras de los Andes, ya que aquí se encuentran algunos de los picos más elevados del Hemisferio Occidental.

Las zonas de la precordillera, las "travesías" y Sierras Pampeanas en San Juan, tienen por lo general (en el siglo XX) un clima árido de sierras y campos, con oasis de riego. El clima presenta una gran amplitud térmica, dado que en invierno se alcanzan temperaturas que pueden alcanzar los cinco grados bajo cero y en verano las temperaturas máximas superan los cuarenta grados.



### 1.2.3. Provincia de Santa Cruz

La Provincia de Santa Cruz es una de las 23 provincias que hay en la República Argentina. A su vez, es uno de los 24 estados autogobernados que conforman el país y uno de los 24 distritos electorales legislativos nacionales. Su capital y ciudad más poblada es Río Gallegos. Está ubicada al sur de la región patagónica, la cual ocupa la mitad sur del país, limitando al norte con Chubut, al este con el océano Atlántico y al sur y oeste con la región de Magallanes y de Aysén de la República de Chile. Con 243 943 km<sup>2</sup> es la segunda provincia más extensa, por detrás de Buenos Aires, con 273 964 habitantes en 2010, la segunda menos poblada, por delante de Tierra del Fuego, Antártida e islas del Atlántico Sur, y con 1.1 hab/km<sup>2</sup>, la menos densamente poblada. En la Figura 5 pueden observarse los mapas político y físico de esta provincia.



**Figura 5: Izquierda: Mapa Político de la provincia de Santa Cruz – Derecha: Mapa Físico de la provincia de Santa Cruz. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)**

En general, el clima de la región es árido y frío con temperaturas muy bajas casi todo el año y fuertes amplitudes térmicas y lluvias insuficientes, determinando el bioma del semidesierto. Si bien, la zona de la cuenca del río Santa Cruz en su región extraandina se encuentra favorecida por un clima morigerado merced al fuerte influjo oceánico, esta es la región de las llamadas Pampas de Diana, hacia los contrafuertes y pedemontes andinos también es importante la humedad, hasta el grado de favorecer la existencia de bosques, aunque debido a las altitudes, la franja húmeda cordillerana, con un promedio anual de precipitaciones de 800 mm, es fría casi todo el año.

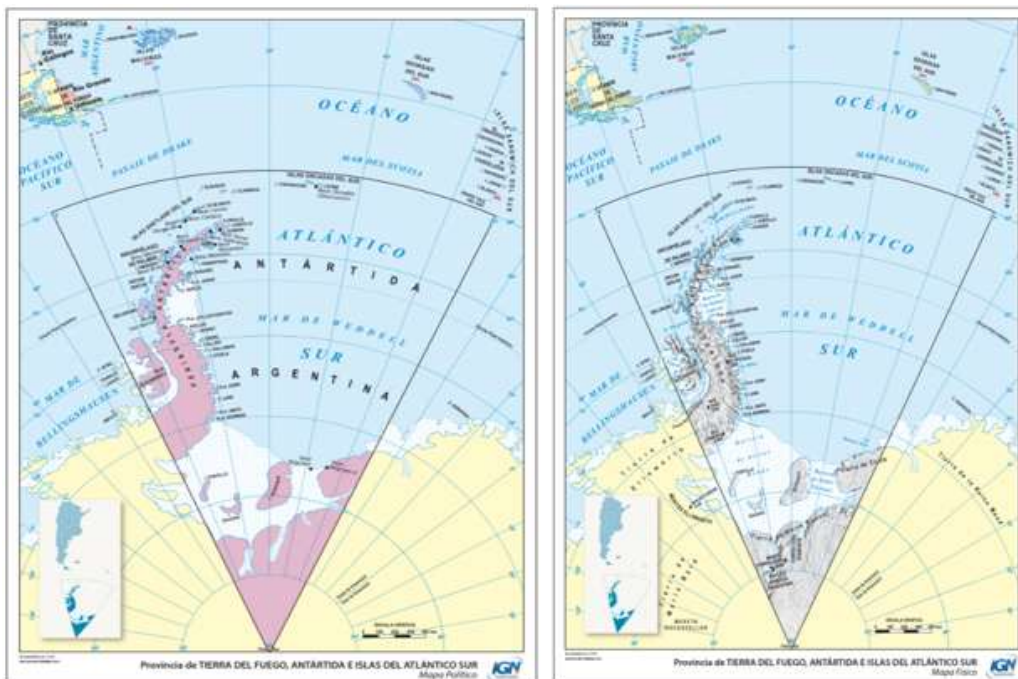
Otro rasgo típico del clima de la mayor parte de la provincia de Santa Cruz es el soplo casi constante de vientos procedentes del océano Pacífico.

Dos tipos de clima conviven en la provincia de Santa Cruz: el clima árido patagónico del centro y este y el clima frío húmedo del oeste. En una delgada franja que se extiende de norte a sur a lo largo de la cordillera patagónica, prevalece el clima frío húmedo que tiene la influencia del Pacífico en lo que hace a la producción de lluvias y nieve.

Las precipitaciones disminuyen de oeste a este, haciendo notorio el contraste paisajístico entre la región montañosa lluviosa del oeste y la meseta de reducidas precipitaciones. El viento que sopla del oeste, noroeste y suroeste, es un verdadero protagonista que erosiona todo a su paso.

#### 1.2.4. Provincia de Tierra del Fuego

La Provincia de Tierra del Fuego es una de las 23 provincias que componen la República Argentina. A su vez, es uno de los 24 estados autogobernados que conforman el país y uno de los 24 distritos electorales legislativos nacionales. Su capital es Ushuaia y su ciudad más poblada, Río Grande. En la Figura 6 pueden observarse los mapas político y físico de esta provincia.



**Figura 6: Izquierda: Mapa Político de la provincia de Tierra del Fuego – Derecha: Mapa Físico de la provincia de Tierra del Fuego. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)**

Está ubicada la región patagónica, en el extremo sur de la Argentina, y ocupa un amplio territorio insular, marítimo y antártico, que se extiende desde la Isla Grande de Tierra del Fuego al Polo Sur,



incluyendo la Isla de los Estados, las Islas Malvinas, las Islas del Atlántico Sur, la Península Antártica, formando un triángulo cuyos lados son los meridianos 74°O y 25°O y su vértice el Polo Sur. En la porción americana, la provincia limita al norte con la provincia de Santa Cruz, al oeste con Chile y al sur del Canal de Beagle, también con Chile. En la Antártida, la provincia también limita al oeste con Chile, aunque los límites no están establecidos. Con 1 002 445 km<sup>2</sup> es la provincia más extensa (incluyendo los territorios en litigio) y con 160 720 habitantes en 2010, la menos poblada.

### **1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.**

#### **1.3.1. Objetivo General.**

El objetivo general de este trabajo es regionalizar la lluvia máxima diaria en las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

#### **1.3.2. Objetivos Particulares.**

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

- ❖ Realizar la búsqueda, depuración, esquematización y análisis de los datos pluviométricos existentes en las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.
- ❖ Participar en la recopilación, depuración y análisis preliminar de información pluviométrica.
- ❖ Entrenamiento en el uso y aplicación de un programa específico para el análisis estadístico (descriptivo e inferencial) de datos.
- ❖ Estimar los valores de lluvias máximas diarias para distintos períodos de retorno (T) 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 [km<sup>2</sup>] utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG).

### **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 las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.
- 3) Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.
- 4) Determinación del año hidrológico.
- 5) Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
- 6) Verificación de las series históricas de lluvias diarias seleccionadas mediante pruebas estadísticas tales como independencia, estacionariedad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.
- 7) Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
- 8) Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
- 9) Comparación de los mapas obtenidos vs los mapas de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

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

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

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.

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

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

### 2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

Es esencial poder realizar un análisis inicial para encontrar los parámetros básicos para resumir la distribución de un conjunto de datos de una variable cuantitativa. Se determinan medidas resumen de posición (Mediana y Media) que informan dónde se ubican algunos datos representativos del conjunto sobre la recta de los números reales, y también se calculan medidas de dispersión (Varianza, Desvío y Estandar) y medidas de forma (Simetría y Curtosis) de la distribución de la variable. La distribución de un conjunto de datos se encuentra situada en un intervalo de valores, siempre hay un valor mínimo y un valor máximo. La diferencia entre dichos valores es el rango o recorrido de la distribución.

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

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

Ecuación 1

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

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

Ecuación 2

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

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

Ecuación 3

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

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

Ecuación 4

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

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

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

Ecuación 5

La asimetría normalmente se construye en forma adimensional dividiendo la Ecuación 5 por  $\sigma^3$  para dar el coeficiente de asimetría  $\gamma$ :

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

Ecuación 6

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

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

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

### 2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie.

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

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

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

Ecuación 7

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

Tabla 1: Valores  $K_n$  para la prueba de datos atípicos

Tamaño de muestra	$K_n$	Tamaño de muestra	$K_n$	Tamaño de muestra	$K_n$	Tamaño de muestra	$K_n$
10	2,036	24	2,467	38	2,661	60	2,837
11	2,088	25	2,486	39	2,671	65	2,866
12	2,134	26	2,502	40	2,682	70	2,893
13	2,175	27	2,519	41	2,692	75	2,917
14	2,213	28	2,534	42	2,700	80	2,940
15	2,247	29	2,549	43	2,710	85	2,961
16	2,279	30	2,563	44	2,719	90	2,981
17	2,309	31	2,577	45	2,727	95	3,000
18	2,335	32	2,591	46	2,736	100	3,017
19	2,361	33	2,604	47	2,744	110	3,049
20	2,385	34	2,616	48	2,753	120	3,078
21	2,408	35	2,628	49	2,760	130	3,104
22	2,429	36	2,639	50	2,768	140	3,129
23	2,448	37	2,650	55	2,804		

### 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  $\alpha$ . 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:

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

**Ecuación 8**

Dónde:

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

**Ecuación 9**

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

**Ecuación 10**

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

### 2.2.3. Prueba de Estacionariedad (Kendall).

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

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

**Ecuación 11**

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

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

**Ecuación 12**

En donde  $t(i)$  es el número de valores en la serie tal que  $X_j < X_i$ , siendo  $i < j \leq n$ . Con los valores de S y T calculados con las Ecuaciones 11 y 12, 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:

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

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

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

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

**Ecuación 13**

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

**Tabla 2: Valores de  $K_{cri}$  para la prueba de Kendall**

$\alpha$	0,01	0,05	0,1
$K_{cri}$	2,33	1,64	1,28

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

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para efectuar esta prueba se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños  $N_1$  y  $N_2$ , por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las  $N = N_1 + N_2$

observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más, de modo que el rango  $N$  queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon  $T_1$ , es simplemente la suma de los rangos asignados a las  $n_1$  observaciones de la muestra más pequeña. Para cualquier valor entero  $n$ , la suma de los  $n$  primeros enteros consecutivos pueden calcularse fácilmente como  $N(N+1)/2$ . La estadística de prueba  $T_1$ , más la suma de los rangos asignados a los  $N_2$  elementos de la segunda muestra,  $T_2$ , por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir:

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

**Ecuación 14**

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

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

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



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

**Ecuación 14**

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

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

**Ecuación 15**

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

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

**Ecuación 17**

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

### 2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

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

- ❖ Función de distribución de probabilidad empírica.
- ❖ Ajuste de función de distribución de probabilidad.
  - Ajuste por el Método de Momentos.
  - Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.
- ❖ Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

#### 2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.

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

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

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

**Ecuación 18**

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

### **2.3.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad.**

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

#### **2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos.**

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

Si a cada uno de los valores de la información se le asigna una masa hipotética igual a su frecuencia relativa de ocurrencia (1/n) y si se imagina que este sistema de masas rota alrededor del origen  $x = 0$ , 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 19**

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 20**

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

momento central estandarizado,  $\gamma = E [(x-\mu)^3] / \sigma^3$ , para determinar el segundo y el tercer parámetro de la distribución si se requiera.

### 2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.

Fue desarrollado por Fisher, (1922). Él razonó que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. Si se supone que el espacio muestral se divide en intervalos de longitud  $dx$  y se toma una muestra de observaciones independientes e idénticamente distribuidas  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . El valor de la densidad de probabilidad para  $X = x_i$  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 21. Como el producto:

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

**Ecuación 21**

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

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

**Ecuación 22**

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

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

**Ecuación 23**

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

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

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

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

**Ecuación 24**

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

En cuanto al método empírico tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia  $P(n_p, n_d, n_o)$  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.

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

**Ecuación 25**

Cuando el evento critico persiste menos de un año puede considerarse  $n_d = 1$ . Luego la Ecuación 25 queda:

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

**Ecuación 26**

En el análisis hidroeconómico se determina el tiempo de retorno de manera tal que los costos totales sean mínimos. Para la determinación de los costos totales se debe tener en cuenta que si bien al aumentar el periodo de retorno se reducen los costos o riesgos ante una falla, la magnitud y costo de una obra se ven incrementadas; para este método la cantidad de información necesaria es mucho mayor que para los demás.

En la Tabla 3 se presentan rangos de valores usualmente seleccionados de periodos de retorno para el diseño de estructuras de control en las que se ven implicados fenómenos hidrológicos.

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

<b>Tipo de Estructuras</b>	<b>Periodo de Retorno (años)</b>
Alcantarilla	
Volúmenes de tráfico bajo	05-10
Volúmenes de tráfico medio	10-25
Volúmenes de tráfico alto	50-100
Puentes	
Sistemas secundarios	5-50
Sistemas primarios	50-100
Drenaje urbano	
Alcantarillas pequeñas	2-25
Alcantarillas grandes	25-50

### 3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA.

#### 3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA.

Se recopiló información de lámina de lluvia diaria de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

En estas provincias se cuenta con 52, 4, 13 y 3 estaciones pluviométricas respectivamente (tanto activas como inactivas en la actualidad) que se obtuvieron de la Base de Datos Hidrológica Integrada de la subsecretaria de Recursos hídricos (Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda – página web: <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>), del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (INTA – página web: <http://siga2.inta.gov.ar/#/> ) y también recopiladas de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional.

#### 3.2. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.

En las siguientes tablas se muestran las estaciones recopiladas para las provincias de Chubut (Tabla 4), San Juan (Tabla 5), Santa Cruz (

Tabla 6) y Tierra del Fuego (

Tabla 7) con sus coordenadas correspondientes. Luego en las Figura 7 y Figura 8 se ve la localización de las estaciones en sus respectivas provincias.

**Tabla 4: Estaciones pluviométricas recopiladas en la provincia de Chubut.**

Nº	Estación	Latitud	Longitud
1	El Maiten	-42.10	-71.17
2	La angostura	-42.19	-71.40
3	Muelle	-42.21	-71.43
4	Cholila	-42.50	-71.54
5	Gualjaina	-42.61	-70.38
6	Puerto Chucao	-42.73	-71.76
7	Arrayanes	-42.74	-71.73
8	Lago Verde	-42.74	-71.74
9	Canelo	-42.94	-72.05
10	Huemul	-43.04	-71.83
11	Los Alerces	-43.02	-71.71
12	Parque Nacional Los Alerces	-42.97	-71.58
13	Estancia Amancay	-42.99	-71.56
14	Ruta a Futalaufquen	-42.99	-71.49

Nº	Estación	Latitud	Longitud
15	Estancia el Principio	-42.96	-71.38
16	Valle Chico	-42.93	-71.27
17	Puente Tubería	-43.13	-71.63
18	Escuela Nº 90	-43.13	-71.55
19	Balsa Garzón	-43.14	-71.57
20	Ruta a Chile	-43.20	-71.57
21	Ruta a Chile Nanty fall	-43.17	-71.51
22	Boquete Nahuel pan	-43.08	-71.25
23	Lago Rosario	-43.24	-71.36
24	Nacimiento (Hielo-Nacimiento)	-43.33	-71.64
25	Frontera	-43.56	-71.73
26	Cerro Centinela	-43.50	-71.63
27	Puesto Blanco	-43.53	-71.58
28	Carrenleufú	-43.71	-71.60
29	Nacimiento Rio Poncho Moro	-43.69	-71.42
30	La Elena	-43.68	-71.30
31	Lago Vinter	-43.92	-71.43
32	Jaramillo	-43.84	-71.23
33	Rio Pico	-44.17	-71.33
34	La Paulina-Aserradero	-44.97	-71.36
35	Nacimiento Rio Senguerr	-44.96	-71.34
36	Paso Rio Mayo	-45.68	-70.25
37	Los Molinos	-45.49	-69.50
38	El Fortín	-45.58	-69.27
39	Sarmiento	-45.58	-69.08
40	Los Altares	-43.89	-68.40
41	Ameghiño	-43.70	-66.47
42	Chacra 25 de Julio	-43.40	-65.82
43	Colan Conhué - EEA Esquel	-43.23	-69.92
44	Gualjaina - EEA Esquel	-42.73	-70.50
45	INTA - Chubut	-43.27	-65.36
46	Sarmiento - Chubut	-45.61	-69.07
47	P Golondrinas - EEA Bariloche	-41.96	-71.52
48	Paso del Sapo - EEA Esquel	-42.74	-69.60
49	Paso de los Indios EEA Chubut	-43.36	-68.58
50	Puerto Piramides - EEA Chubut	-42.54	-64.29
51	Sarmiento - EEA Chubut	-45.60	-69.03
52	Inta Trelew	-43.23	-65.30

**Tabla 5: Estaciones pluviométricas recopiladas en la provincia de San Juan.**

Nº	Estación	Latitud	Longitud
53	Jachal	-30.24	-68.75
54	Km 47.3	-31.53	-68.88
55	Km 101	-31.25	-69.18
56	San Juan	-31.51	-68.63

**Tabla 6: Estaciones pluviométricas recopiladas en la provincia de Santa Cruz.**

Nº	Estación	Latitud	Longitud
57	Calafate	-50.34	-72.35
58	Charles Fuhr	-50.25	-71.91
59	Estancia Entre Rios (Nansen)	-48.26	-72.22
60	Gobernador Gregores	-48.75	-70.26
61	La Leona	-49.80	-72.06
62	Lago Argentino	-50.32	-75.26
63	Parque Nacional los Glaciares	-50.33	-73.23
64	Perito Moreno	-50.47	-73.04
65	Puerto Deseado	-47.76	-65.93
66	Rio Gallegos	-51.61	-69.28
67	Rio Turbio	-51.53	-72.33
68	San Julian	-49.30	-67.75
69	Santa Cruz	-49.39	-72.84

**Tabla 7: Estaciones pluviométricas recopiladas en la provincia de Tierra del Fuego.**

Nº	Estación	Latitud	Longitud
70	Rio Grande	-53.77	-67.77
71	Tolhuin	-54.50	-67.23
72	Ushuaia	-54.80	-68.37



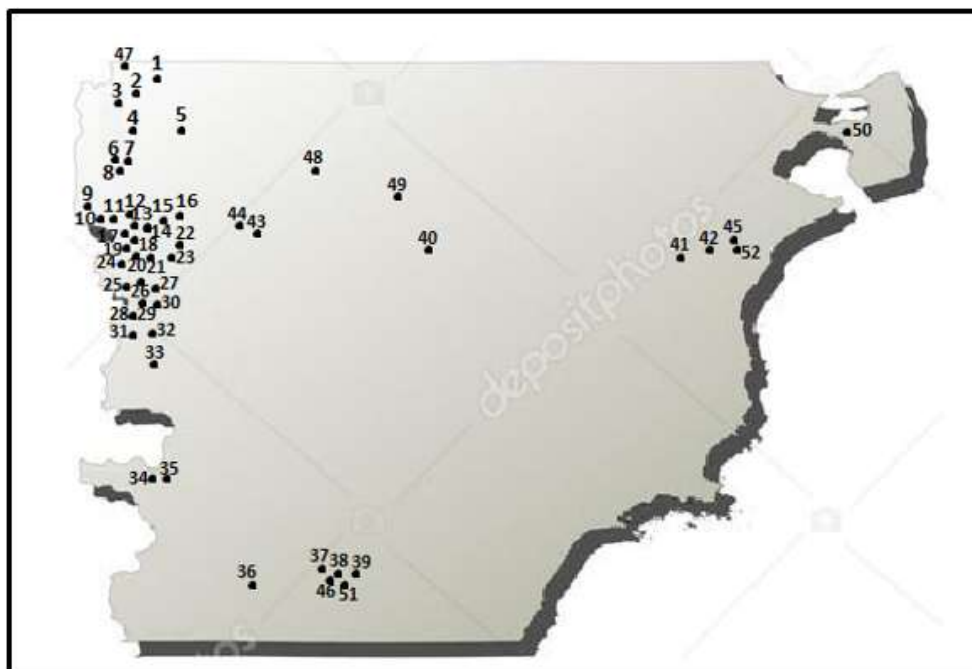


Figura 7: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Chubut.

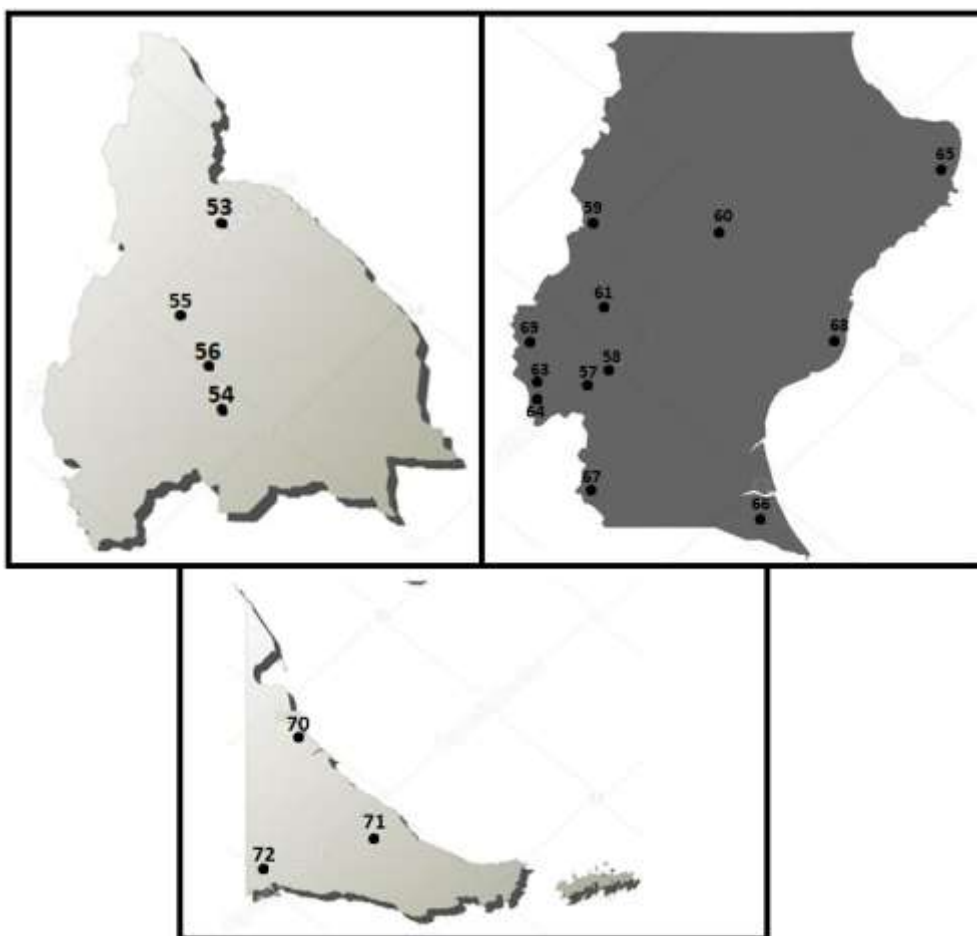


Figura 8: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en las provincias de San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

### 3.3. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.

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

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

Teniendo en cuenta estudios similares realizados en provincias vecinas, para homogeneizar el análisis realizado en nuestra región de estudio, se adoptó un criterio menos restrictivo. Se decidió la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a  $14$  años, utilizándose de esta manera  $44$  de las  $72$  estaciones disponibles.

En la Tabla 8, Tabla 9 , Tabla 10 y Tabla 11 se pueden observar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie. Aquellas estaciones con más de catorce años de registro son las que se sometieron a las verificaciones subsiguientes.

**Tabla 8: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Chubut en función de su longitud de serie**

Longitud de serie – Chubut		
Estaciones con datos	52	Porcentaje
$1 < \text{Longitud de serie} < 14$	26	50.00%
Longitud de serie $\geq 14$	26	50.00%
Longitud de serie $\geq 20$	23	44.23%

**Tabla 9: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de San Juan en función de su longitud de serie**

Longitud de serie – San Juan		
Estaciones con datos	4	Porcentaje
$1 < \text{Longitud de serie} < 14$	1	25.00%
Longitud de serie $\geq 14$	3	75.00%
Longitud de serie $\geq 20$	3	75.00%

**Tabla 10: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Santa Cruz en función de su longitud de serie**

Longitud de serie – Santa Cruz		
Estaciones con datos	13	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	2	15.38%
Longitud de serie >= 14	11	84.61%
Longitud de serie >= 20	10	76.92%

**Tabla 11: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Tierra del Fuego en función de su longitud de serie**

Longitud de serie – Tierra del Fuego		
Estaciones con datos	3	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	0	0.00%
Longitud de serie >= 14	3	100.00%
Longitud de serie >= 20	3	100.00%

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

En el presente capítulo, en base a los registros pluviométricos de una estación ejemplo elegida, se explican los pasos que se realizaron para el análisis estadístico completo descrito en el capítulo 2.

Para ello se empleó el software FACETA, desarrollado por el grupo de trabajo. El programa permite relacionar una serie de máximos de una variable hidrológica dada (en este caso precipitaciones diarias) con diferentes recurrencias. FACETA cuenta con una interfaz amigable y de fácil aplicación, se ha realizado en español y permite una rápida y sencilla visualización de los resultados que se van obteniendo.

Al programa desarrollado se le introduce como input una serie hidrológica de máximos en un archivo tipo planilla de cálculo de dos columnas en formato “.xls”. A continuación, se detallan las capacidades de este:

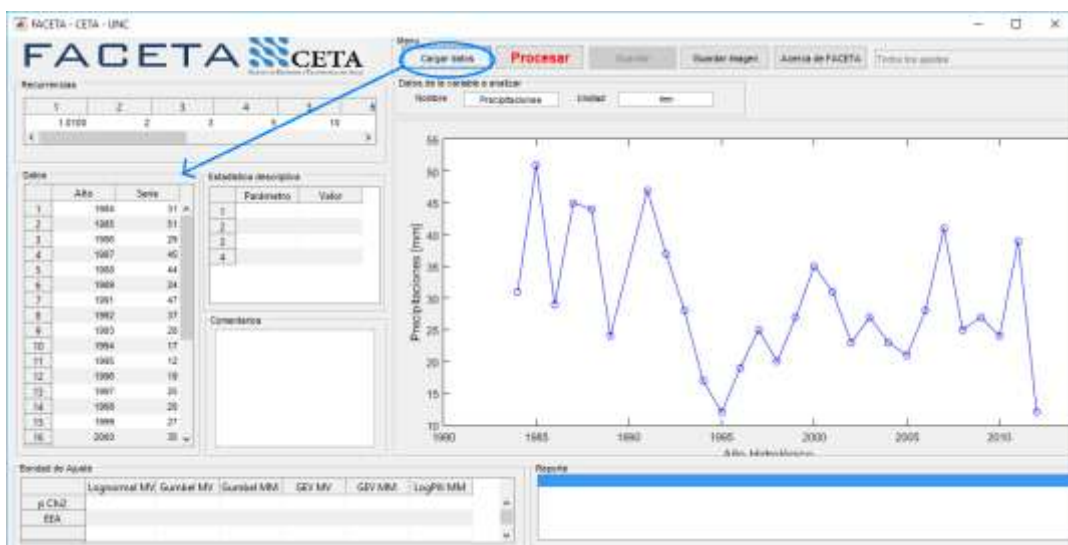
- Selección de los tiempos de retorno para los cuales se deseen estimar los parámetros hidrológicos.
- Verificación de hipótesis estadísticas de la serie histórica de máximos: el programa realiza la prueba de independencia de Wald-Wolfowitz, estacionariedad de Mann Kendall y homogeneidad a escala anual de Wilcoxon, además de la detección de datos atípicos de Chow.
- Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media, desvío estándar, máximo, mínimo, mediana, etc.).
- Análisis de estadística inferencial mediante la aplicación de la función de distribución de probabilidad (FDP) empírica de Weibull; además de 6 FDP teóricas: Log Normal de 2 parámetros; Gumbel; General de Valores Extremos (GEV) y Log Pearson tipo III. Los parámetros de ajuste de cada una de estas distribuciones de población se obtienen según los procedimientos adaptados para cada una de ellas, entre los que se cuentan: Método de Momentos (MM) y Máxima Verosimilitud (MV).
- Realización de dos series de pruebas de bondad de ajuste a cada una de las 6 FDP teóricas aplicadas. El programa realiza la prueba de Chi Cuadrado y estima también el Error Estándar de Ajuste (EEA). Vale aclarar que la función que mejor ajusta es aquella que arroja el mayor valor de “p” en la prueba de Chi Cuadrado o bien arroja el menor valor de “EEA”.
- Guardado de los resultados alcanzados: permite guardar en forma de tablas en formato “.xls” los resultados numéricos alcanzados y en forma de figuras en formato “.jpg” diferentes imágenes con resultados obtenidos.





**Figura 10: Presentación del programa Faceta**

c) En la pestaña “Cargar Datos” se carga el archivo en “xlsx”. Así el programa en una primera instancia muestra un gráfico de precipitaciones vs años hidrológico (Figura 11).



**Figura 11: Pantalla del Faceta luego de ingresar datos**

d) Elegir las Recurrencias asociadas a las cuales se desea realizar el análisis de frecuencia (Figura 12).

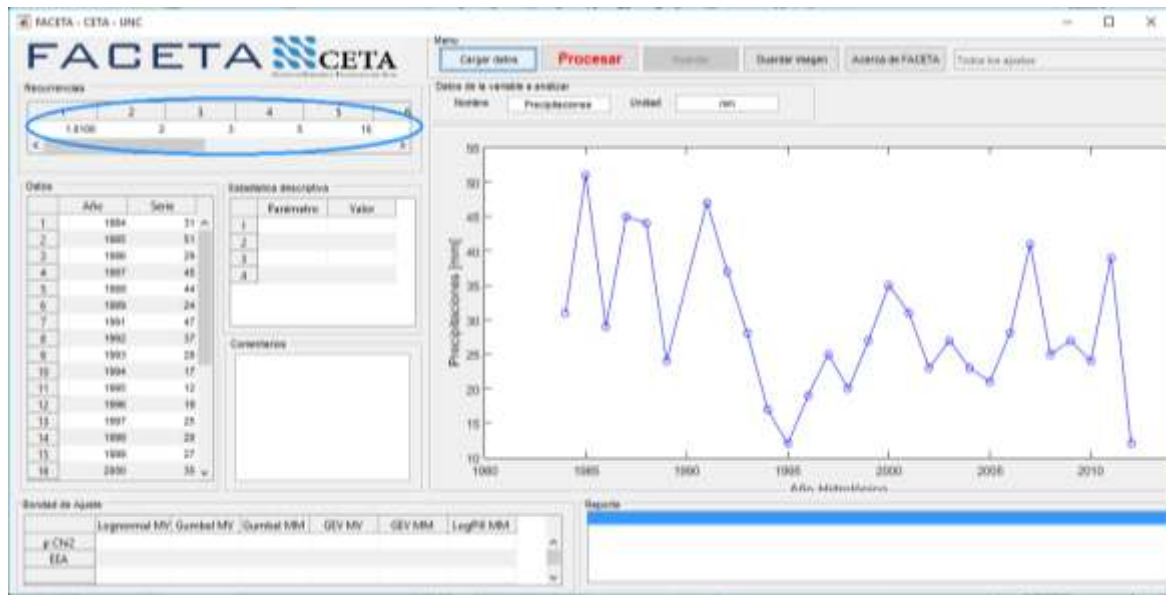


Figura 12: Pantalla del Faceta indicando el cuadro de recurrencias.

e) Se oprime “Procesar”, lo cual hace corre el programa. En primer lugar, el software realiza sobre la muestra las siguientes pruebas (las cuales se indican en el cuadro de reporte Figura 13):

- Datos atípicos de Chow,
- Independencia de Anderson-Darling,
- Estacionariedad de Mann Kendall, y
- Homogeneidad a escala anual de Wilcoxon.

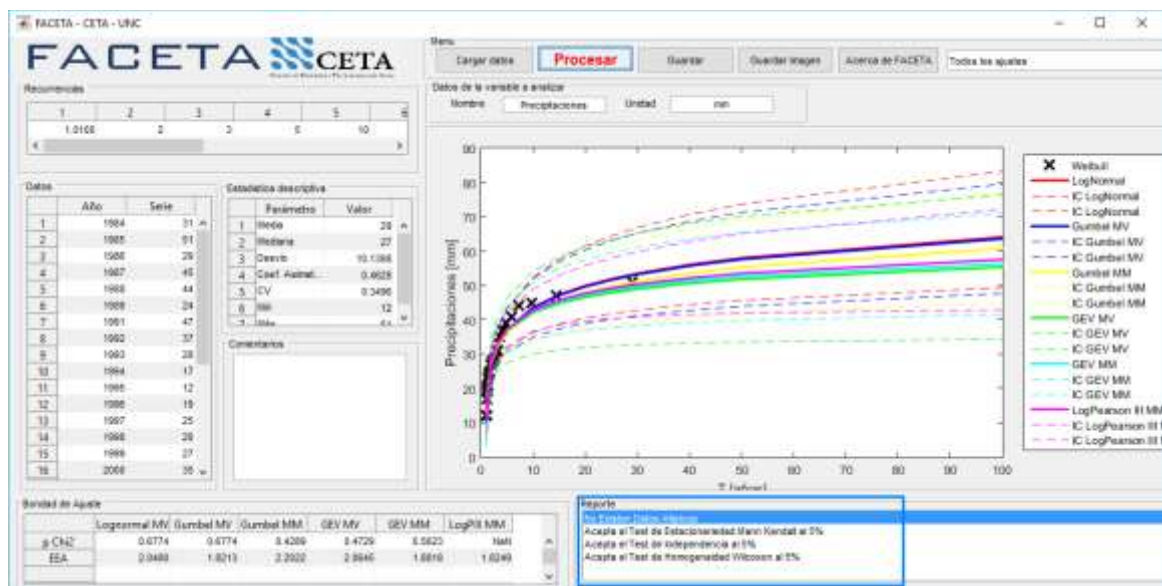
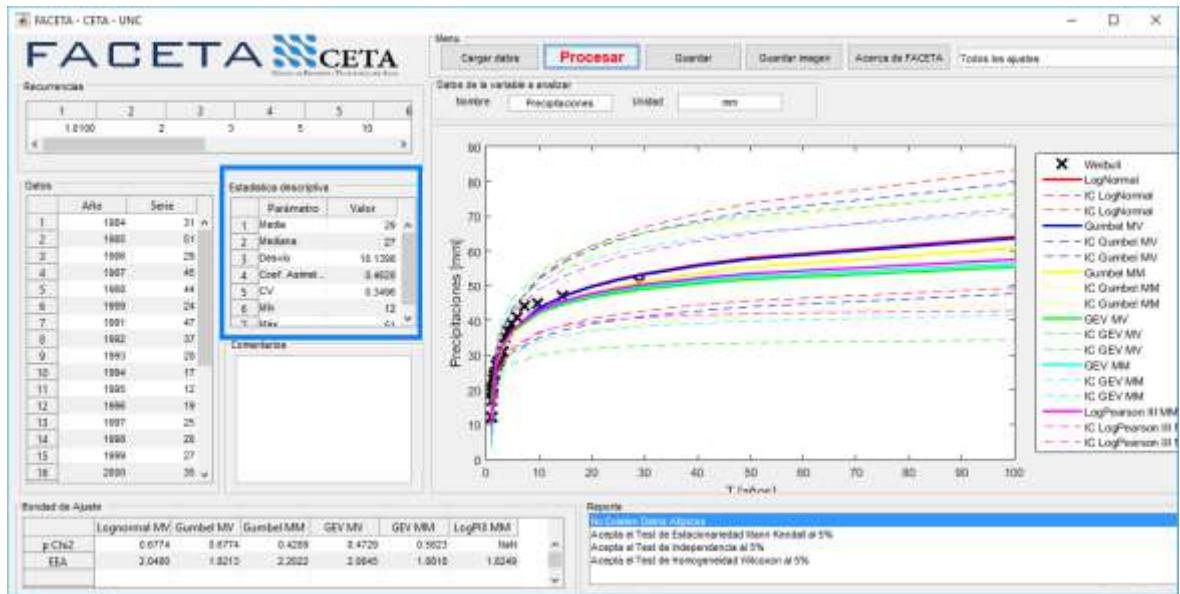


Figura 13: Salida de Faceta cuadro Reporte

En el análisis de estadística descriptiva se calculan los siguientes valores, que se muestran en el recuadro “Estadística descriptiva” (Figura 14):

- Valores mínimos y máximos.
- Mediana.
- Desvío estándar.
- Coeficientes de asimetría.
- Variación.
- Curtosis.



**Figura 14: Salida de Faceta cuadro Estadística descriptiva**

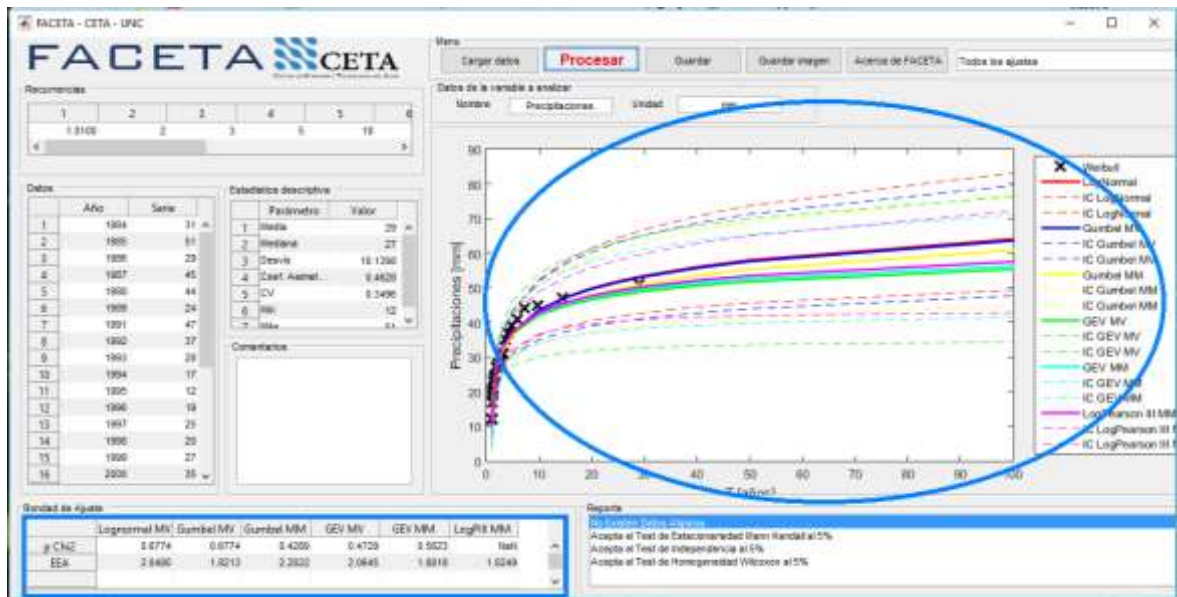
También se ajustan 6 funciones de distribución de probabilidad a dicha serie de máximos y a cada una de ellas se le realizan dos test de bondad de ajuste:

- Chi Cuadrado, y
- Error Estándar de Ajuste (EEA).

Vale aclarar que la función que mejor ajusta es aquella que arroja el mayor valor de “p” en la prueba de Chi Cuadrado o bien arroja el menor valor de “EEA”. Los resultados se muestran en el cuadro “Bondad de Ajuste” (Figura 15).

En la pantalla se grafican cada uno de los ajustes realizados y pueden ser visualizados individualmente o en forma conjunta. Para cada recurrencia no sólo se arroja el valor medio de la variable ajustada sino sus respectivos intervalos de confianza con un 95% de nivel de significancia.





**Figura 15: Salida de Faceta cuadro Bondad de Ajuste y grafico de ajustes**

f) Finalmente, al presionar la opción “Guardar” se puede elegir la carpeta donde se guardarán 3 archivos de Excel:

- Uno denominado “Estadística Descriptiva” con los parámetros de estadística descriptiva de la muestra.
- Otro denominado “Test Bondad Ajuste” con los resultados de los 2 test de bondad de ajuste realizados sobre las 6 funciones de distribución de probabilidad.
- Y finalmente otro denominado “Resultados” con los 6 ajustes de las funciones de distribución de probabilidad. Para cada recurrencia se guardará el valor medio de la variable ajustada y sus respectivos intervalos de confianza con un 95% de nivel de significancia.

#### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR.

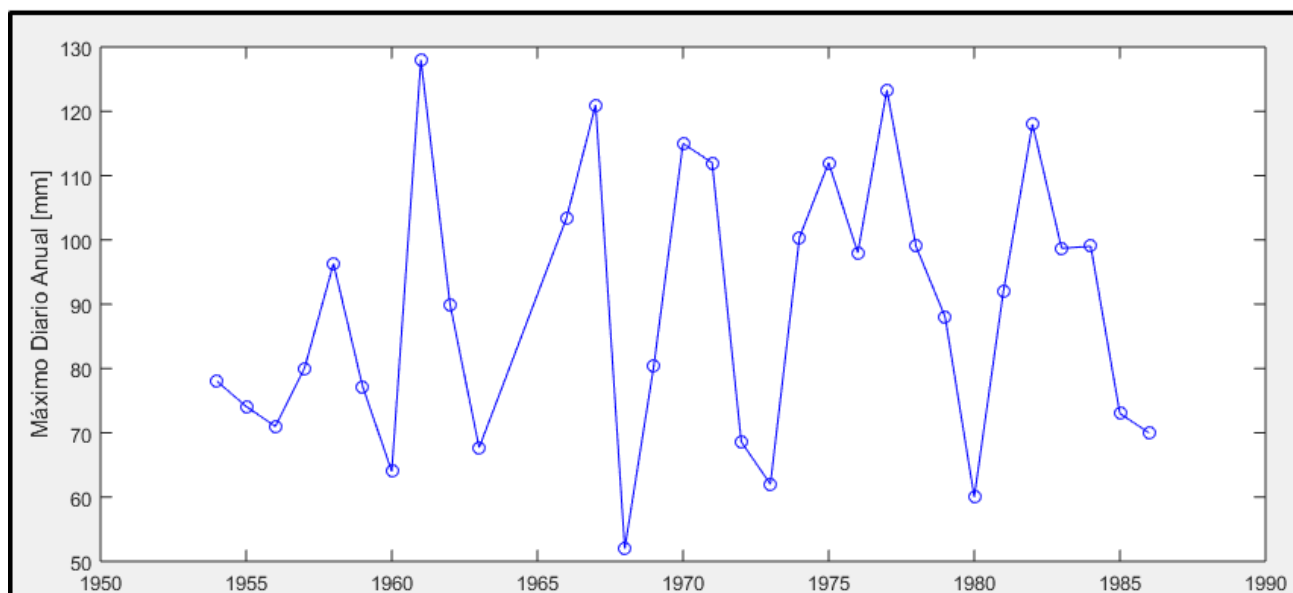
Se presenta el análisis estadístico completo de los registros de lluvia diaria de la estación La Angostura (código interno 2) localizada en la provincia de Chubut. Se elige esta serie por tener una longitud de registro de datos de 31 años. En forma similar se analizaron las otras 72 estaciones de las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

En la Tabla 12 se puede apreciar la forma en que se proporcionaron los datos de la estación La Angostura; y se observa que se partió en este caso de las láminas de lluvia máximas diarias de cada año hidrológico.

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

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

Siguiendo con el análisis de la estación La Angostura (que será analizadas a modo de ejemplo en forma completa en este capítulo), en la Figura 16 se presenta la evolución temporal de los máximos valores anuales de lluvia diaria en función del año en que se registró el evento para la estación.



**Figura 16: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación La Angostura en Chubut.**

**Tabla 12: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación La Angostura en Chubut.**

Estación La Angostura	
Año	PMDA
1954	78
1955	74.1
1956	71

Estación La Angostura	
Año	PMDA
1957	80
1958	96.3
1959	77.2
1960	64
1961	128
1962	90
1963	67.7
1966	103.4
1967	121
1968	52
1969	80.5
1970	115
1971	112
1972	68.6
1973	62
1974	100.4
1975	112
1976	98
1977	123.3
1978	99
1979	88
1980	60
1981	92
1982	118
1983	98.7
1984	99
1985	73
1986	70

## 4.2. 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.

Dentro de la “Planilla modelo” en la pestaña “Datos Básicos” se tiene una tabla con los datos pluviométricos, y al pie de esta tabla están calculados los valores de media, máximo y desvío.

Cuando ejecutamos el programa FACETA también tenemos en primera instancia la Estadística descriptiva en la pantalla del programa (Tabla 13) y al guardar los resultados se crea un archivo Excel el cual se transfiere copiando y pegando el cuadro en la pestaña “Faceta Muestra”. La planilla modelo

instantáneamente compara los valores de media obtenidos en la pestaña “Datos Básicos” y la del cuadro resultante del FACETA para corroborar que los datos no difieren en un 5% lo cual indicaría un error.

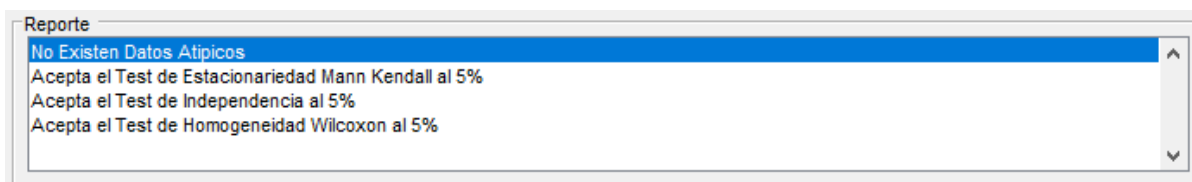
**Tabla 13: Tabla de Estadística Descriptiva en “Planilla Modelo” pestaña “Faceta Muestra”.**

<b>Media</b>	89.42580645
<b>Mediana</b>	90
<b>Desvío</b>	20.8789522
<b>Coefficiente de Asimetría</b>	0.140131222
<b>Coefficiente de Variación</b>	0.23347793
<b>Mínimo</b>	52
<b>Máximo</b>	128

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

Como se explicó en el capítulo 4, al ejecutar el programa FACETA se obtiene el cuadro “Reporte” para darnos los resultados de los test necesarios para definir como representativa a la muestra. Lo primero es identificar la existencia de datos atípicos de Chow.

En las pruebas de Independencia de Anderson-Darling, Estacionariedad de Mann Kendall y Homogeneidad a escala anual de Wilcoxon se puede aceptar a un nivel de significancia al 5%; de no ser así se realiza para un 1% y de no aceptarlo al 1% se rechaza esa estación. En la Figura 17 se muestra el cuadro de “Reporte” para La Angostura.



**Figura 17: Cuadro de Reporte de test al procesar el FACETA para La Angostura.**

#### 4.3.1. Detección de datos atípicos.

Los datos atípicos en la serie se detectan utilizando la metodología presentada en la sección 2.2.1. Esto se puede realizar en primera instancia desde el Excel “Planilla Modelo” en la pestaña “Datos Básicos”. En la Tabla 14 se observa el test realizado implementando el uso de las herramientas de Excel en la serie de la estación pluviométrica La Angostura. En este caso no se detectaron Datos atípicos.

**Tabla 14: Planilla de datos pluviométricos**

n	PMDA	Año	LnMax	Datos	Completa (x-media) <sup>2</sup>	Trunca (x-media) <sup>2</sup>
				Atípicos		
1	78	1954	4.357	VERIFICA	130.55	102.82
2	74.1	1955	4.305	VERIFICA	234.88	197.12
3	71	1956	4.263	VERIFICA	339.51	293.78
4	80	1957	4.382	VERIFICA	88.85	66.26
5	96.3	1958	4.567	VERIFICA	47.25	66.59
6	77.2	1959	4.346	VERIFICA	149.47	119.68
7	64	1960	4.159	VERIFICA	646.47	582.74
8	128	1961	4.852	VERIFICA	1487.97	1588.82
9	90	1962	4.500	VERIFICA	0.33	3.46
10	67.7	1963	4.215	VERIFICA	472.01	417.79
11	103.4	1966	4.639	VERIFICA	195.28	232.87
12	121	1967	4.796	VERIFICA	996.93	1079.78
13	52	1968	3.951	VERIFICA	1400.69	1306.10
14	80.5	1969	4.388	VERIFICA	79.67	58.37
15	115	1970	4.745	VERIFICA	654.04	721.46
16	112	1971	4.718	VERIFICA	509.59	569.30
17	68.6	1972	4.228	VERIFICA	433.71	381.81
18	62	1973	4.127	VERIFICA	752.17	683.30
19	100.4	1974	4.609	VERIFICA	120.43	150.31
20	112	1975	4.718	VERIFICA	509.59	569.30
21	98	1976	4.585	VERIFICA	73.52	97.22
22	123.3	1977	4.815	VERIFICA	1147.46	1236.23
23	99	1978	4.595	VERIFICA	91.67	117.94
24	88	1979	4.477	VERIFICA	2.03	0.02
25	60	1980	4.094	VERIFICA	865.88	791.86
26	92	1981	4.522	VERIFICA	6.63	14.90
27	118	1982	4.771	VERIFICA	816.48	891.62
28	98.7	1983	4.592	VERIFICA	86.01	111.51
29	99	1984	4.595	VERIFICA	91.67	117.94
30	73	1985	4.290	VERIFICA	269.81	229.22
31	70	1986	4.248	VERIFICA	377.36	329.06

En el caso de presentar dato atípico, el mismo se elimina y se vuelve a realizar el análisis. Si la prueba verifica entonces se continúa con el procedimiento, de lo contrario la muestra no pasa la prueba de datos atípicos.

En nuestro caso no se presentó datos atípicos, por lo que se puede continuar con el análisis.

Al hacer correr el programa Faceta este también realizará el análisis para detectar datos atípicos. Como la serie que procesamos con el programa ya fue examinada debería verificar.

#### 4.3.2. Prueba de Independencia.

Luego de realizada la prueba de datos atípicos, se procede a realizar la verificación de las otras hipótesis estadísticas detalladas en la sección 2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA. a través del programa FACETA; como ya se indicó anteriormente el mismo es 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. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz)., permite verificar la existencia de una autocorrelación significativa de primer orden entre las observaciones. Esto muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15: Resultado del test de Independencia para la estación La Angostura.**

Test Estadístico	Verifica al 5%	Verifica al 1%	No verifica al 1%
Independencia Anderson-Darling	X		

Se observa que se acepta la hipótesis  $H_0$  (las observaciones son independientes) a un nivel de significancia de 5%. 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").

#### 4.3.3. Prueba de Estacionariedad.

La prueba de estacionariedad de Kendall (detallada en la sección 2.2.3) permite verificar si existe una tendencia en la serie. Esto se muestra en la Tabla 16.

**Tabla 16: Resultado del test de Estacionariedad para la estación La Angostura.**

Test Estadístico	Verifica al 5%	Verifica al 1%	No verifica al 1%
Estacionariedad Mann Kendall	X		

Se puede observar que la serie de la estación analizada verifica la prueba de Estacionariedad al aceptar la hipótesis  $H_0$  (en este caso esta hipótesis indica que no hay tendencia en las observaciones) a un nivel de significancia de 5%.

#### 4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

La prueba de homogeneidad del promedio a escala anual de Wilcoxon (detallada en la sección 2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).) permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra.

El primer subgrupo se compone de las observaciones que comienzan con el primer año y terminan con un año de corte (1971), el segundo subgrupo está integrado a partir del año siguiente al año de corte hasta las observaciones finales.

En la Tabla 17 se muestra el resultado del análisis realizado para la estación en cuestión, se puede observar que verifica la prueba de Homogeneidad al aceptar la hipótesis  $H_0$  a un nivel de significancia de 5% por lo que no se puede concluir que los promedios de las dos submuestras son diferentes.

**Tabla 17: Resultado del test de Homogeneidad para la estación La Angostura.**

Test Estadístico	Verifica al 5%	Verifica al 1%	No verifica al 1%
Homogeneidad Wilcoxon	X		

#### 4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

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

##### 4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad.

Las funciones de distribución y métodos de ajuste ensayados fueron:

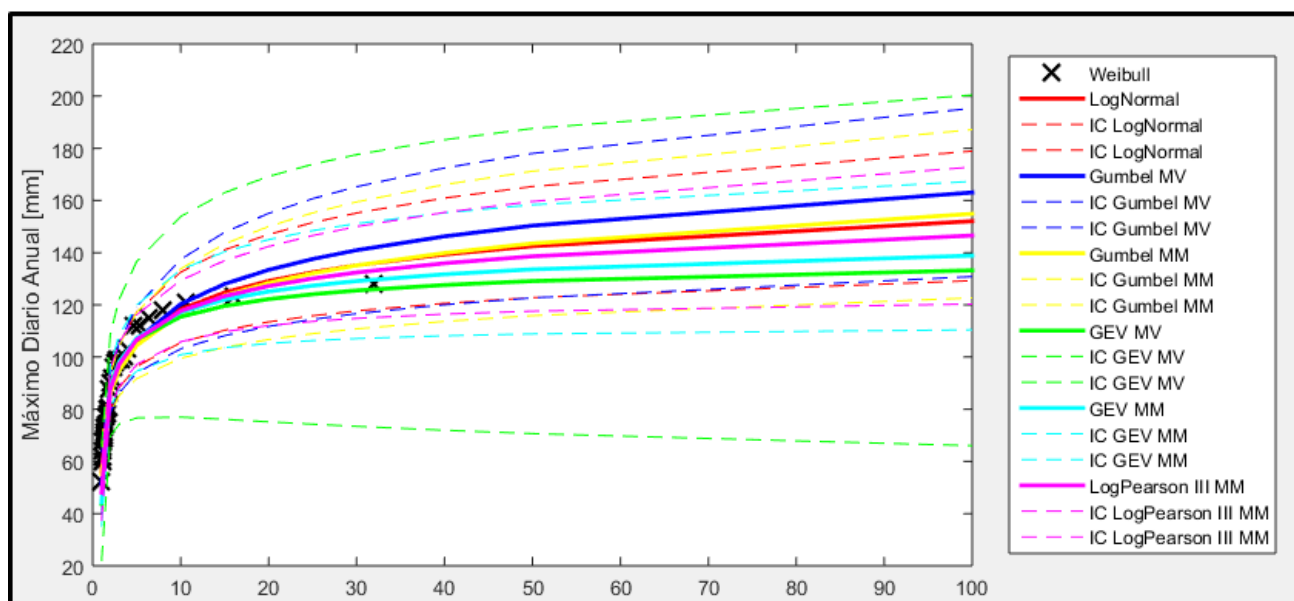
- a) GEV (Método de Max. Verosimilitud).
- b) Gumbel (Método de Max. Verosimilitud).
- c) LogNormal (Método de Max. Verosimilitud).
- d) GEV (Método de Momentos).
- e) Gumbel (Método de Momentos).
- f) LogPearson tipo III (Método de Momentos).

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 una misma función de distribución de probabilidades para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales; se optó por la función LogNormal, que coincide con la estimación por el método de las normales. Se realizó un análisis de

sensibilidad a esta decisión al comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos. Esto se muestra al final del capítulo.

Los ajustes antes mencionados se realizaron con el software FACETA. Al realizarlos, el programa, por defecto, selecciona 12 periodos de retorno diferentes (1.01, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 100) para realizar la estimación de láminas de lluvia diaria y sus intervalos de confianza.

Los resultados del análisis inferencial que están en el archivo que generó FACETA con nombre de "Resultado" (Tabla 18) se copian y pegan en la tercera pestaña de la "Planilla Modelo". En la Figura 18 se observa el grafico de resultado de las 6 funciones de ajuste para la estación La Angostura.



**Figura 18: Grafico de Resultado de la estación La Angostura con 6 ajustes de las funciones de distribución de probabilidad. Valor medio de la variable ajustada y sus respectivos intervalos de confianza.**

Se destaca en los resultados reportados en la Tabla 18 la importancia de la amplitud de los intervalos de confianza para los valores de la variable analizadas 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.

Este aumento del intervalo que se observa, del valor estimado, es debido a que la longitud de la serie histórica, en años, es mucho menor al periodo de retorno analizado. La bibliografía aconseja que la cantidad de años en los cuales se puede realizar una extrapolación confiable es igual a cuatro veces la cantidad de datos obtenidos; es decir, que para un registro de 20 años puede realizarse una extrapolación viable de hasta 80 años (probabilidad de no excedencia= 0,99); a partir de ese punto aumenta la incertidumbre de los valores obtenidos por los métodos de ajuste. Esto es recomendable al definir el periodo



de retorno conveniente para el diseño de una obra, por lo que nuestro análisis sólo llega hasta los 100 años, con lo cual será válido para el cálculo de caudales de pequeñas y medianas obras.

**Tabla 18: Cuadro de Resultado de la estación pluviométrica La Angostura con 6 ajustes de las funciones de distribución de probabilidad. Valor medio de la variable ajustada y sus respectivos intervalos de confianza.**

T [años]	LN MV IC Inf	LogNormal MV	LN MV IC Sup	Gumbel MV IC Inf	Gumbel MV	Gumbel MV IC Sup	Gumbel MM IC Inf	Gumbel MM	Gumbel MM IC Sup
1.01	49.41	56.62	64.89	39.61	51.51	63.40	43.24	55.13	67.03
2	79.99	87.02	94.68	78.47	86.02	93.56	78.45	86.00	93.54
3	88.22	96.35	105.21	86.19	95.78	105.36	85.14	94.73	104.31
5	96.42	106.34	117.29	93.94	106.65	119.35	91.74	104.45	117.15
10	105.56	118.28	132.54	103.15	120.31	137.46	99.51	116.66	133.82
15	110.29	124.73	141.07	108.22	128.01	147.81	103.76	123.56	143.35
20	113.45	129.14	146.99	111.73	133.41	155.08	106.71	128.38	150.06
25	115.82	132.48	151.53	114.43	137.56	160.70	108.97	132.10	155.23
30	117.70	135.16	155.20	116.62	140.95	165.27	110.80	135.12	159.45
40	120.59	139.32	160.95	120.04	146.26	172.48	113.66	139.88	166.09
50	122.77	142.49	165.36	122.69	150.37	178.05	115.87	143.55	171.23
100	129.26	152.08	178.92	130.83	163.08	195.32	122.67	154.92	187.16
T [años]	GEV MV IC Inf	GEV MV	GEV MV IC Sup	GEV MM IC Inf	GEV MM	GEV MM IC Sup	LogPearson III MM IC Inf	LogPearson III MM	LogPearson III MM IC Sup
1.01	21.78	43.67	65.56	34.98	44.25	53.51	37.19	48.04	58.88
2	69.72	89.22	108.73	80.47	88.73	96.98	80.08	87.74	95.40
3	74.28	98.18	122.08	88.01	98.13	108.24	88.70	97.10	105.51
5	76.69	106.65	136.61	94.62	107.30	119.98	97.18	106.68	116.17
10	76.97	115.41	153.84	100.89	117.15	133.42	105.85	117.62	129.40
15	76.12	119.57	163.02	103.61	121.99	140.38	109.74	123.36	136.98
20	75.17	122.20	169.22	105.21	125.11	145.01	112.06	127.22	142.37
25	74.27	124.07	173.87	106.29	127.37	148.44	113.65	130.11	146.56
30	73.43	125.51	177.59	107.08	129.12	151.16	114.82	132.41	150.00
40	71.94	127.61	183.29	108.16	131.72	155.28	116.46	135.95	155.43
50	70.65	129.12	187.60	108.86	133.61	158.36	117.58	138.62	159.65
100	66.02	133.22	200.42	110.43	138.87	167.31	120.32	146.57	172.82

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

En la Tabla 19 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.

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

**Tabla 19: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)**

Tr	Porcentaje de variación % respecto a Log Normal					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	87.6%	91.3%	93.3%	98.2%	100.0%	97.6%
50	90.6%	93.8%	94.8%	99.3%	100.0%	97.3%
25	94.7%	96.1%	96.3%	98.0%	100.0%	99.9%
20	94.6%	96.9%	96.8%	99.4%	100.0%	98.5%
10	97.6%	99.0%	98.3%	98.6%	100.0%	99.4%
5	99.7%	99.1%	99.7%	98.2%	100.0%	99.7%
2	97.5%	98.1%	98.8%	98.8%	100.0%	99.2%

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

En este apartado se busca sintetizar los resultados más relevantes de la información de todas las estaciones analizadas de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

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

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

#### 5.1.1. Detección de presencia de Datos Atípicos.

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

En nuestro caso se descartó una estación por la presencia de datos atípicos la cual se observa en la Tabla 20.

**Tabla 20: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de datos atípicos de sus valores máximos diarios.**

Nº	Estación	Provincia	Longitud de la serie [años]	Latitud	Longitud
4	Cholila	Chubut	60	-42.50	-71.54

#### 5.1.2. Prueba de Independencia.

De las estaciones que contaban con longitud de serie mayor a 14 años y no contaban con la presencia de datos atípicos, 3 no verificaron la prueba de independencia al 1%. Las mismas se detallan en la Tabla 21.

**Tabla 21: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.**

Nº	Estación	Provincia	Longitud de la serie [años]	Latitud	Longitud
8	Lago Verde	Chubut	32	-42.74	-71.74
10	Huemul	Chubut	27	-43.04	-71.83
12	Los Alerces	Chubut	36	-42.97	-71.58

### 5.1.3. Prueba de Estacionariedad.

De las estaciones que fueron sometidas a la Prueba de Estacionariedad (Kendall) con una longitud de datos mayor a 14 años, que no contaban con datos atípicos, y que pasaron la prueba de independencia, 7 no verificaron el test. En la Tabla 22 se observan dichas estaciones.

**Tabla 22: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Estacionariedad de sus valores máximos diarios.**

Nº	Estación	Provincia	Longitud de la serie [años]	Latitud	Longitud
24	Nacimiento (Hielo-Nacimiento)	Chubut	25	-43.33	-71.64
25	Frontera	Chubut	26	-43.56	-71.73
27	Puesto Blanco	Chubut	27	-43.53	-71.58
29	Nacimiento Rio Poncho Moro	Chubut	25	-43.69	-71.42
59	Estancia Entre Rios (Nansen)	Santa Cruz	27	-48.26	-72.22
71	Tolhuin	Tierra Del Fuego	20	-54.50	-67.23
72	Ushuaia	Tierra Del Fuego	27	-54.80	-68.37

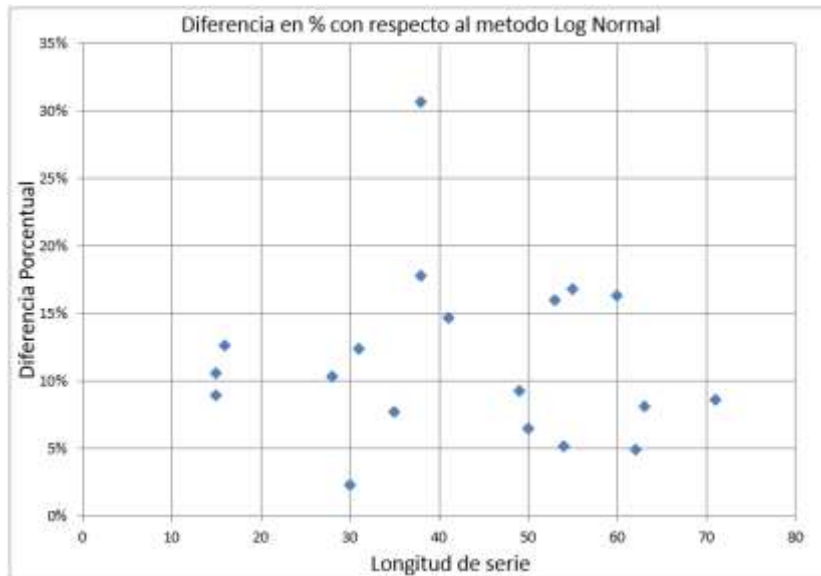
### 5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos y todas las que pasaron las pruebas anteriores también pasaron la prueba de homogeneidad.

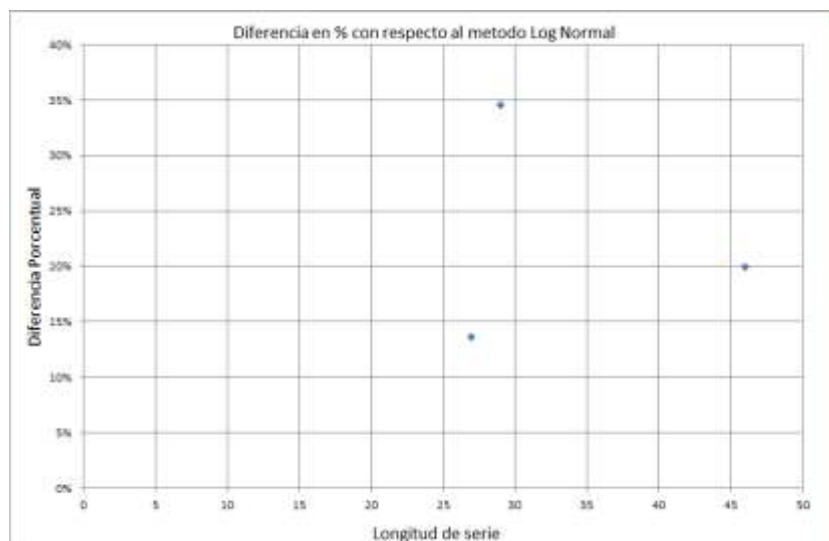
Por lo tanto, se concluye que de las 72 estaciones pluviométricas con las que se inició el análisis en las 4 provincias, 44 cumplen con el mínimo de longitud de serie, pero 33 pasaron las pruebas mencionadas representando estas el 45.84% del total.

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

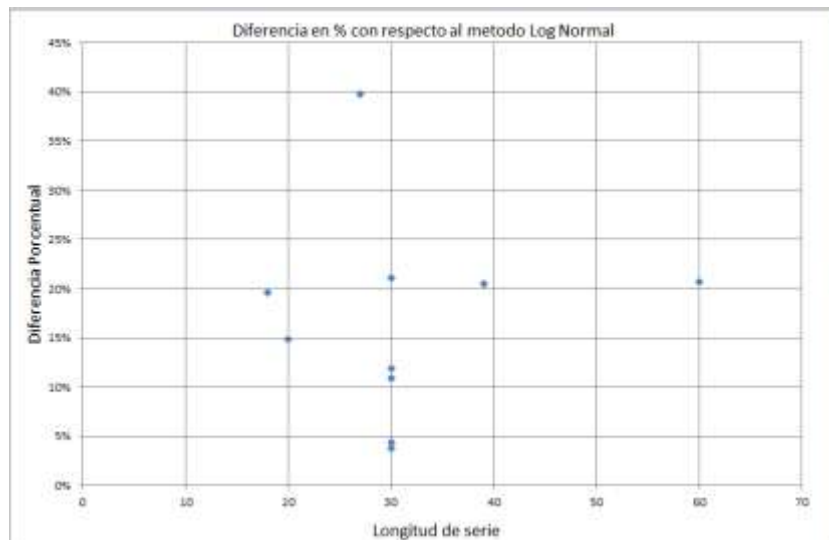
A continuación, se analiza la evolución con la longitud de la serie de la máxima diferencia porcentual entre la función Lognormal y la función de distribución que más se aleja de esta para T=100 años. Se puede observar en la Figura 19, Figura 20, Figura 21 y Figura 22 que a medida que crecen las longitudes de serie, la máxima diferencia de algunos valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Lognormal disminuye.



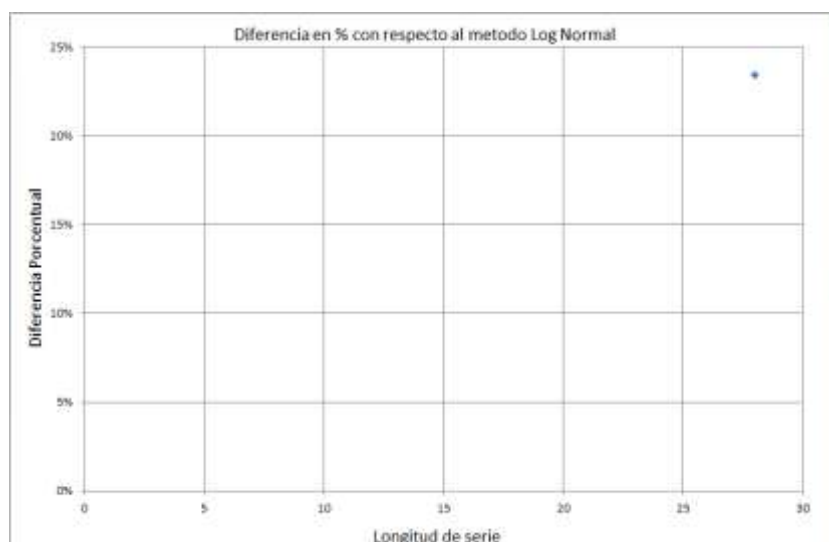
**Figura 19: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad en la provincia de Chubut.**



**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 las estaciones analizadas hasta la actualidad en la provincia de Santa Cruz**

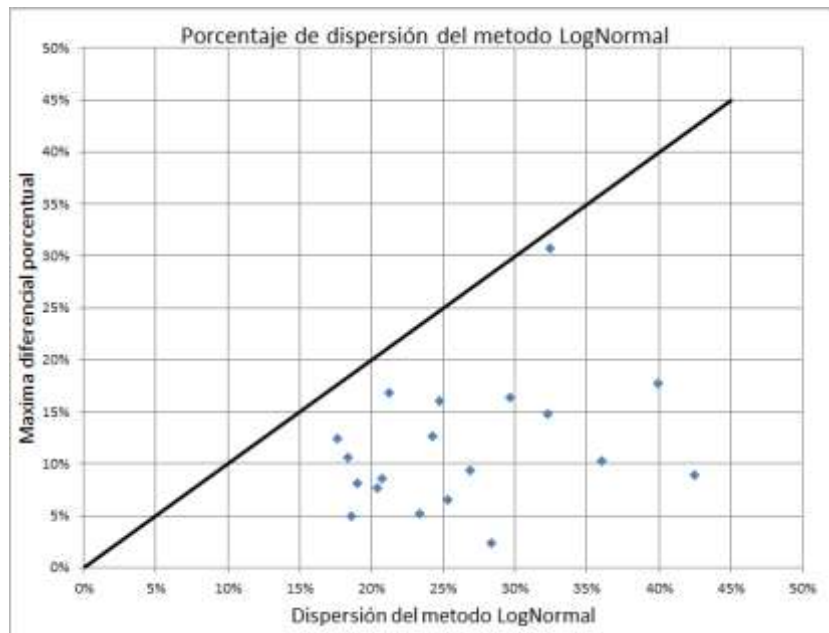


**Figura 21: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad en la provincia de Santa Cruz.**

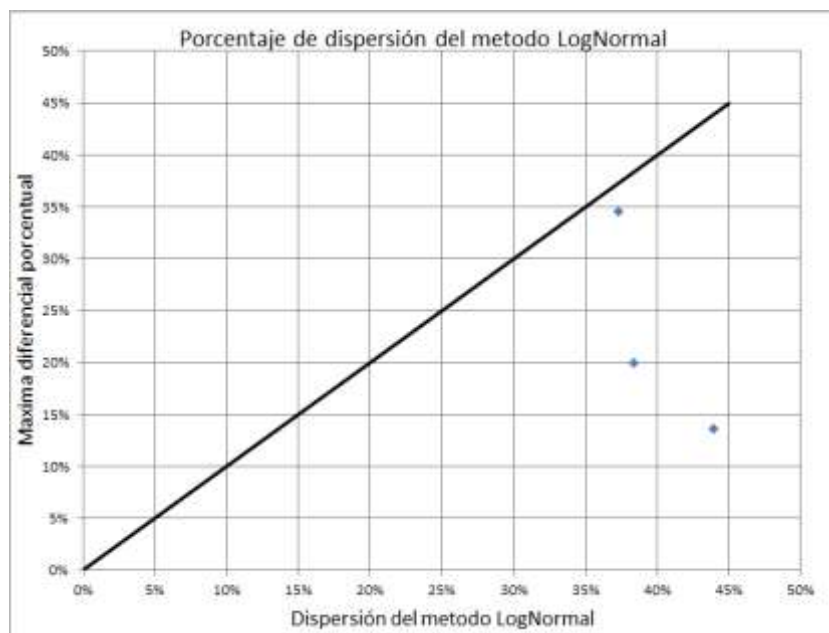


**Figura 22: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad en la provincia de Tierra del Fuego.**

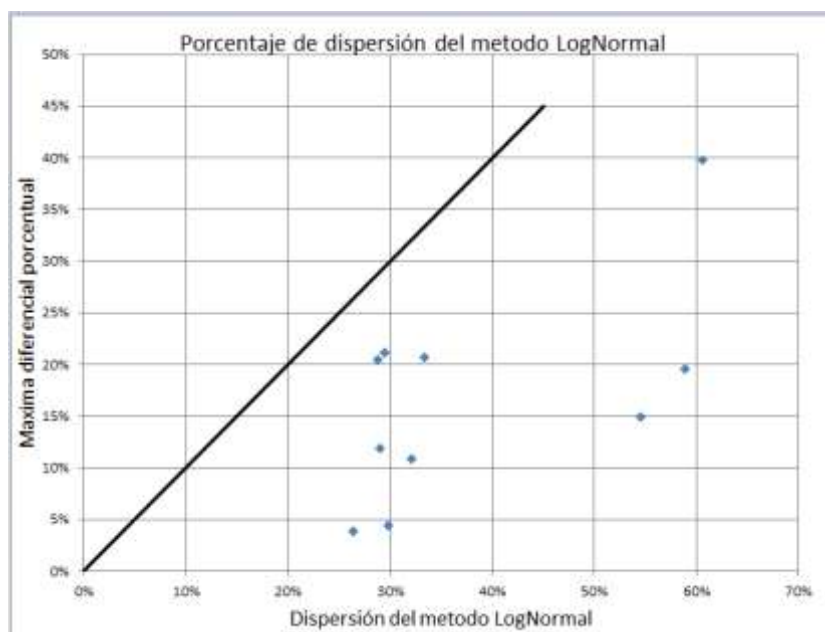
Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se grafica la máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la incertidumbre porcentual del método Lognormal; ambas variables para T=100 años (caso más desfavorable). En la Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se puede ver el análisis realizado.



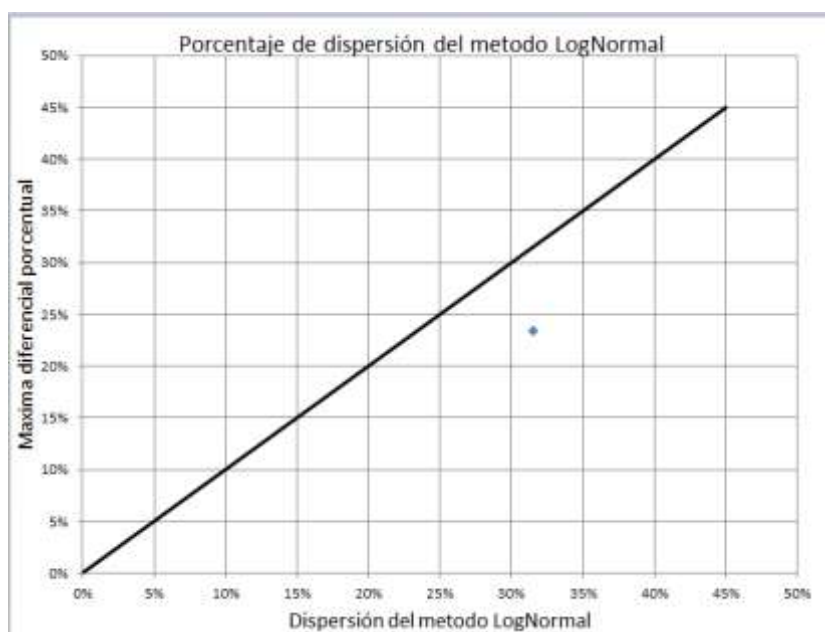
**Figura 23: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función Vs dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años. Provincia de Chubut.**



**Figura 24: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función Vs dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años. Provincia de San Juan.**



**Figura 25: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años. Provincia de Santa Cruz.**



**Figura 26: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años. Provincia de Tierra del Fuego.**

Visualizando estas figuras se observa que casi en la totalidad de los casos la incertidumbre relativa a estimar los valores de lámina con la función de distribución Lognormal es mayor que la máxima diferencia porcentual entre Lognormal y la función de distribución que más se aleja de esta; por lo que es correcto



seleccionar a la función Lognormal como la que define la relación entre la lámina de lluvia precipitada y el tiempo de retorno.

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

## 5.2. ANALISIS DE ESTADISTICA DESCRIPTIVA.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes – Valor máximo de lámina de lluvia anual, Media y Desvío – de las estaciones finalmente seleccionadas (Tabla 23).

**Tabla 23: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Chubut.**

Cod. EHCPA	Nombre de la estación	Provincia	Serie	Máximo	Media(Ln)	Desvío(Ln)	Media - 1	Desvío - 1
1	El Maiten	Chubut	63	109	3.85	0.37	49.39	16.78
2	La angostura	Chubut	31	128	4.47	0.24	88.14	19.95
5	Gualjaina	Chubut	60	80	3.03	0.53	22.85	12.31
14	Ruta a Futalaufquen	Chubut	15	120	4.25	0.36	71.31	24.94
16	Valle Chico	Chubut	54	111.5	3.65	0.41	40.41	15.23
17	Puente Tubería	Chubut	35	148.8	4.28	0.29	72.97	20.09
19	Balsa Garzón	Chubut	30	143.5	4.30	0.36	76.40	27.13
21	Ruta a Chile Nantý fall	Chubut	50	148.2	4.01	0.42	58.39	23.24
22	Boquete Nahuelpan	Chubut	53	138	4.03	0.43	60.04	26.03
23	Lago Rosario	Chubut	55	130	3.90	0.38	51.65	20.52
28	Carrenleufú	Chubut	15	72.3	4.02	0.17	55.04	8.56
30	La Elena	Chubut	62	112	3.91	0.36	52.30	18.42
32	Jaramillo	Chubut	28	90	3.63	0.43	39.48	15.51
33	Río Pico	Chubut	16	58	3.70	0.23	40.45	8.42
34	La Paulina-Aserradero	Chubut	49	93	3.48	0.44	34.49	15.25
36	Paso Río Mayo	Chubut	38	67	3.00	0.55	22.19	12.53
39	Sarmiento	Chubut	38	57	3.13	0.46	24.53	11.70
40	Los Altares	Chubut	71	76	3.11	0.42	23.83	9.30
52	INTA - Trelew	Chubut	41	75.4	3.23	0.47	27.03	12.05
53	Jachal	San Juan	29	37.6	3.03	0.45	22.05	8.53
54	Km 47.3	San Juan	46	98.5	3.14	0.58	25.93	14.89
56	San Juan	San Juan	27	63	3.02	0.50	21.73	10.00
57	Calafate	Santa Cruz	18	46	2.98	0.52	21.06	10.37
58	Charles Fuhr	Santa Cruz	60	75.5	2.83	0.59	19.00	9.71
60	Gobernador Gregores	Santa Cruz	30	37	2.68	0.38	14.93	4.61
61	La Leona	Santa Cruz	39	52.5	2.95	0.42	20.10	8.52
63	Parque Nacional los Glaciares	Santa Cruz	27	63.5	3.29	0.65	30.87	16.32
64	Perito Moreno	Santa Cruz	30	49	2.95	0.40	19.73	7.63
65	Puerto Deseado	Santa Cruz	30	44	2.87	0.37	18.10	6.29
66	Río Gallegos	Santa Cruz	30	39	2.97	0.34	19.87	6.19
68	San Julian	Santa Cruz	30	50	3.15	0.37	24.14	9.14
69	Santa Cruz	Santa Cruz	20	70	3.26	0.52	27.28	12.59
70	Río Grande	Tierra Del Fuego	28	34	2.94	0.38	19.61	6.71

### 5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

Se conformó una tabla resumen con los valores de distribución de probabilidad empírica para los periodos de retorno T= 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años de las estaciones finalmente seleccionadas (Tabla 24) y en la Figura 27 Figura 27: Estaciones finalmente seleccionadas de Chubut (izquierda) y San Juan (derecha).y Figura 28 se muestra la disposición espacial de las mismas en sus respectivas provincias.

**Tabla 24: Valores de lluvias máximas diarias (PMD) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas.**

Cod. EHCPA	Nombre de la estación	Provincia	Serie	PMD2	PMD5	PMD10	PMD20	PMD25	PMD50	PMD100
1	El Maiten	Chubut	63	47.20	64.10	75.40	86.21	89.63	100.17	110.64
2	La angostura	Chubut	31	87.02	106.34	118.28	129.14	132.48	142.49	152.08
5	Gualjaina	Chubut	60	20.62	32.20	40.79	49.59	52.48	61.71	71.32
14	Ruta a Futalaufquen	Chubut	15	70.12	95.02	111.65	127.55	132.58	148.05	163.42
16	Valle Chico	Chubut	54	38.43	54.10	64.87	75.35	78.71	89.12	99.60
17	Puente Tubería	Chubut	35	72.01	91.83	104.47	116.21	119.86	130.92	141.69
19	Balsa Garzón	Chubut	30	73.78	99.90	117.34	134.00	139.27	155.48	171.57
21	Ruta a Chile Nantý fall	Chubut	50	55.15	78.52	94.71	110.56	115.65	131.48	147.48
22	Boquete Nahuel pan	Chubut	53	56.12	80.14	96.82	113.17	118.42	134.79	151.33
23	Lago Rosario	Chubut	55	49.23	67.53	79.86	91.72	95.48	107.10	118.69
28	Carrenleufú	Chubut	15	55.43	64.06	69.17	73.70	75.07	79.12	82.93
30	La Elena	Chubut	62	50.00	67.39	78.95	89.97	93.45	104.15	114.75
32	Jaramillo	Chubut	28	37.77	54.19	65.63	76.87	80.49	91.76	103.19
33	Río Pico	Chubut	16	40.55	49.16	54.44	59.22	60.69	65.08	69.28
34	La Paulina-Aserradero	Chubut	49	32.33	46.75	56.85	66.81	70.02	80.06	90.25
36	Paso Río Mayo	Chubut	38	20.06	31.76	40.53	49.57	52.55	62.10	72.09
39	Sarmiento	Chubut	38	22.80	33.46	41.01	48.51	50.94	58.56	66.33
40	Los Altares	Chubut	71	22.45	31.99	38.61	45.08	47.16	53.63	60.17
52	INTA - Trelew	Chubut	41	25.24	37.52	46.30	55.07	57.92	66.89	76.08
53	Jachal	San Juan	29	20.66	30.17	36.88	43.53	45.68	52.41	59.27
54	Km 47.3	San Juan	46	23.15	37.71	48.85	60.49	64.36	76.84	90.04
56	San Juan	San Juan	27	20.59	31.31	39.11	46.99	49.56	57.71	66.13
57	Calafate	Santa Cruz	18	19.79	30.57	38.50	46.59	49.24	57.66	66.42
58	Charles Fuhr	Santa Cruz	60	16.94	27.76	36.08	44.79	47.70	57.08	67.02
60	Gobernador Gregores	Santa Cruz	30	14.64	20.10	23.79	27.33	28.46	31.93	35.40
61	La Leona	Santa Cruz	39	19.12	27.14	32.69	38.11	39.85	45.26	50.72
63	Parque Nacional los Glaciares	Santa Cruz	27	26.95	46.51	62.13	78.90	84.58	103.12	123.13
64	Perito Moreno	Santa Cruz	30	19.07	26.73	31.98	37.08	38.70	43.75	48.83
65	Puerto Deseado	Santa Cruz	30	17.69	24.10	28.40	32.52	33.83	37.85	41.85
66	Río Gallegos	Santa Cruz	30	19.41	25.79	29.98	33.95	35.20	39.03	42.80
68	San Julian	Santa Cruz	30	23.30	31.88	37.65	43.19	44.95	50.37	55.78
69	Santa Cruz	Santa Cruz	20	25.97	39.97	50.25	60.70	64.13	75.00	86.29
70	Río Grande	Tierra Del Fuego	28	18.82	25.96	30.78	35.43	36.91	41.49	46.05

En las figuras siguientes se puede observar la disposición final de las estaciones seleccionadas en las 4 provincias.

En la provincia de Chubut se puede notar una concentración de estaciones hacia la zona oeste de la provincia y una disminución hacia la zona este.

En cuanto a San Juan se tienen 3 estaciones ubicadas en la zona central distribuidas de norte a sur.

Analizando Santa Cruz vemos una distribución más concentrada hacia el oeste como sucedía en Chubut y finalmente, en Tierra del Fuego solo contamos con una estación ubicada al norte de la provincia.

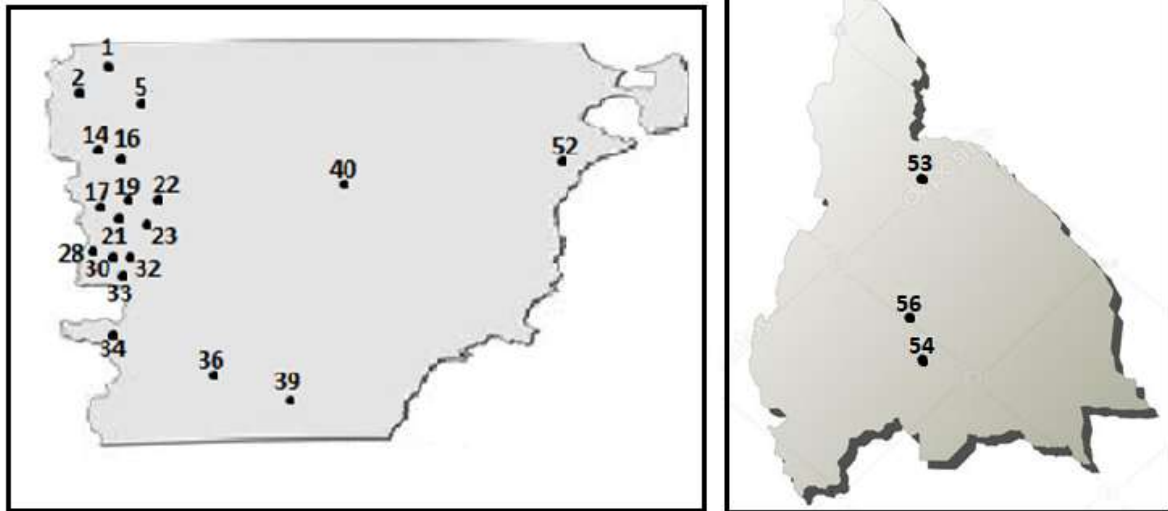


Figura 27: Estaciones finalmente seleccionadas de Chubut (izquierda) y San Juan (derecha).

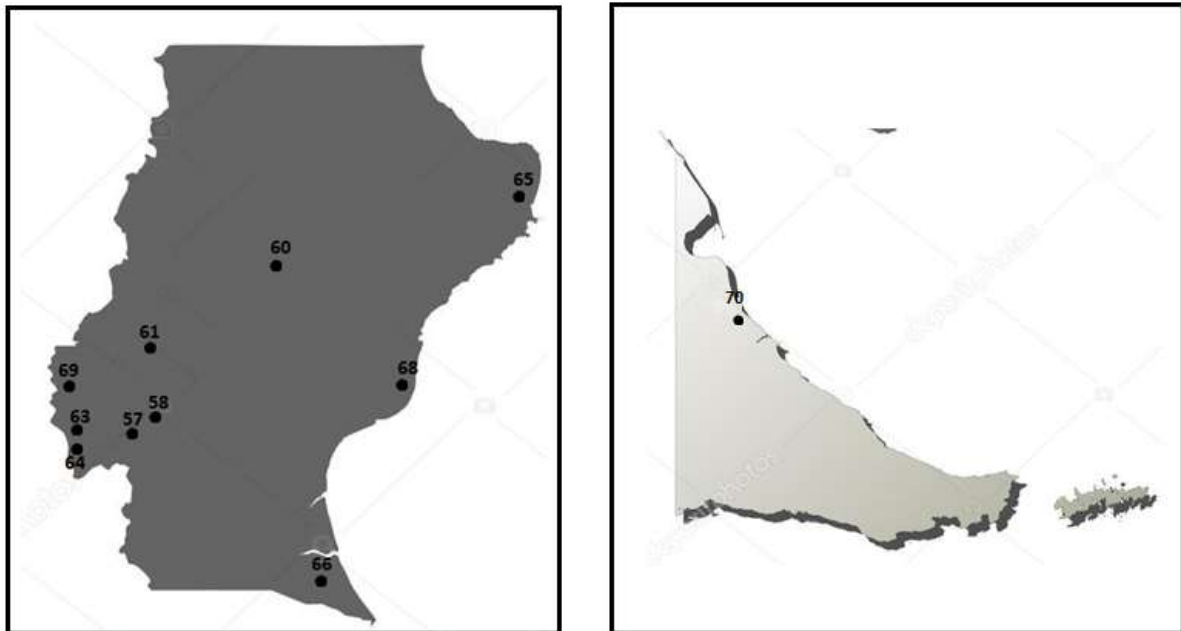


Figura 28: Estaciones finalmente seleccionadas de Santa Cruz (izquierda) y Tierra del Fuego (derecha).

La falta de estaciones en algunas regiones provoca una desventaja ya que existe una falta de información, pero como se verá en el próximo capítulo, gracias a la regionalización se puede considerar un valor de precipitación en esa región sin obtener resultados incoherentes.

## 6. REGIONALIZACION.

### 6.1. INTRODUCCION.

Este trabajo se encuentra comprendido dentro de un proyecto nacional que incluye a todas las provincias de la Argentina y que busca la generación de una herramienta para poder predecir las lluvias máximas diarias asociadas a un tiempo de retorno dado. Es por ello por lo que los mapas aquí presentados no son solamente los de las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego, sino que se muestra la metodología completa de construcción de los mapas de todas las regiones analizadas hasta la actualidad.

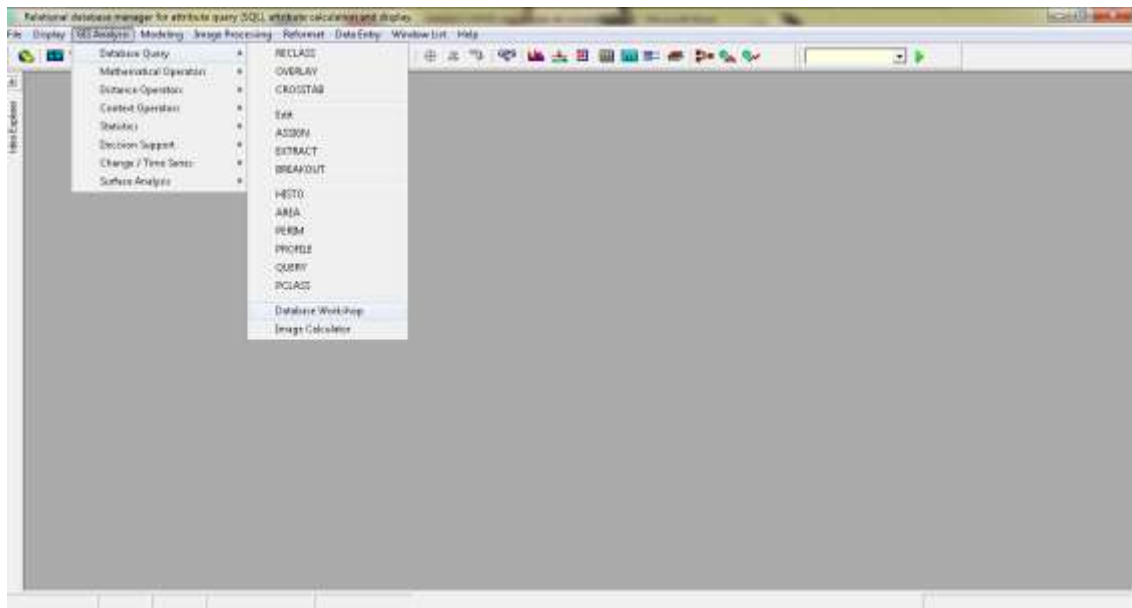
Se procedió a ubicar espacialmente las distintas estaciones pluviométricas y regionalizar los valores de lámina de lluvia para los distintos periodos de retorno, para luego, mediante el empleo de técnicas de análisis espacial poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de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

### 6.2. CREACION DE UNA BASE DE DATOS.

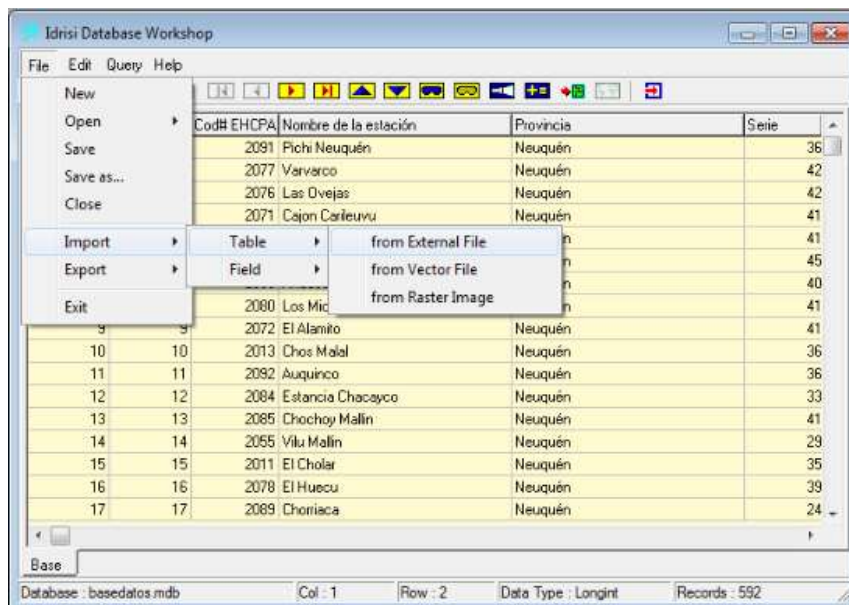
Para la conformación de la base de datos empleada se recurre al paquete computacional IDRISI Selva, con el cual es posible transformar datos numéricos en un archivo digital. La gran virtud de este sistema es la facilidad con la que se puede relacionar información y referenciarla mediante coordenadas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

1. Se realiza una hoja de cálculo, en la cual se visualiza el nombre de las estaciones junto a su código, coordenadas geográficas, parámetros estadísticos, lluvia máxima diaria anual para los distintos periodos de retorno, juntos con sus intervalos de confianza, además de otra información relevante como longitud de serie, departamento, etc.
2. Con la información ya organizada, se prosigue a incorporarla al programa IDRISI Selva. Para ello, es necesario crear una nueva Bases de Datos, en el menú *GIS Analysis* se elige la opción *DatabaseQuery* y luego *DatabaseWorkshop* (Figura 29) o bien a través del menú *Data Entry*. En forma directa se podrá hacer clic sobre el icono en la barra de herramientas.



**Figura 29: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop**

3. Una vez abierto el cuadro de diálogo, se debe crear un nuevo archivo, para lo cual, en el menú *File* se selecciona la opción *New* y se le asigna un nombre.
4. A continuación, se debe importar la planilla de Excel previamente tabulada. En el cuadro de diálogo de *DatabaseWorkshop*, en el menú *File* seleccionar la opción *Import, Table* y posteriormente *From External File* (Figura 30). Finalmente, se debe guardar con la opción *Save* del menú *File*.



**Figura 30: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import**

### 6.3. CREACION DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES

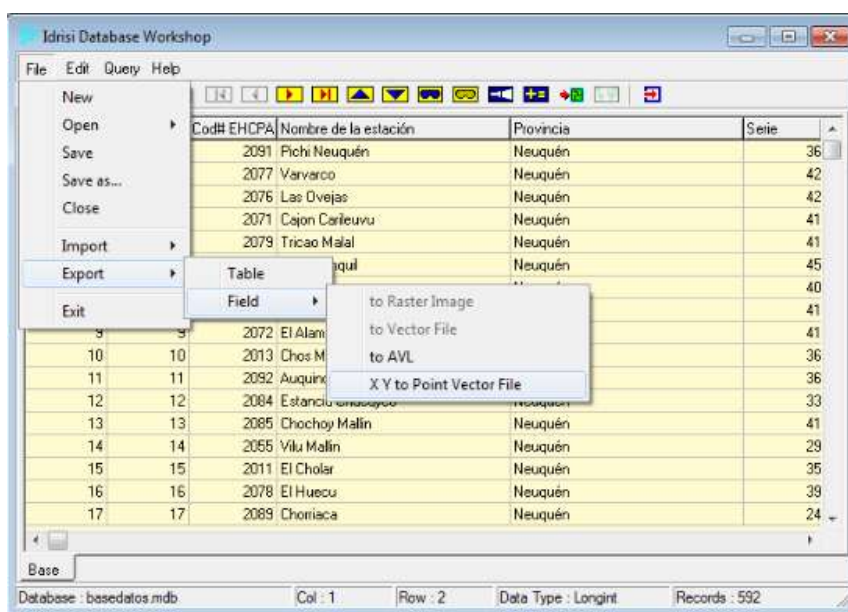
Disponiendo de la base de datos, es necesario crear un archivo de tipo vector punto para posteriormente generar una Imagen Digital. Los archivos de puntos se utilizan para representar

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 pluviométricas 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 primera columna contiene un identificador que puede usarse para asociar el valor con una característica tanto ráster 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.

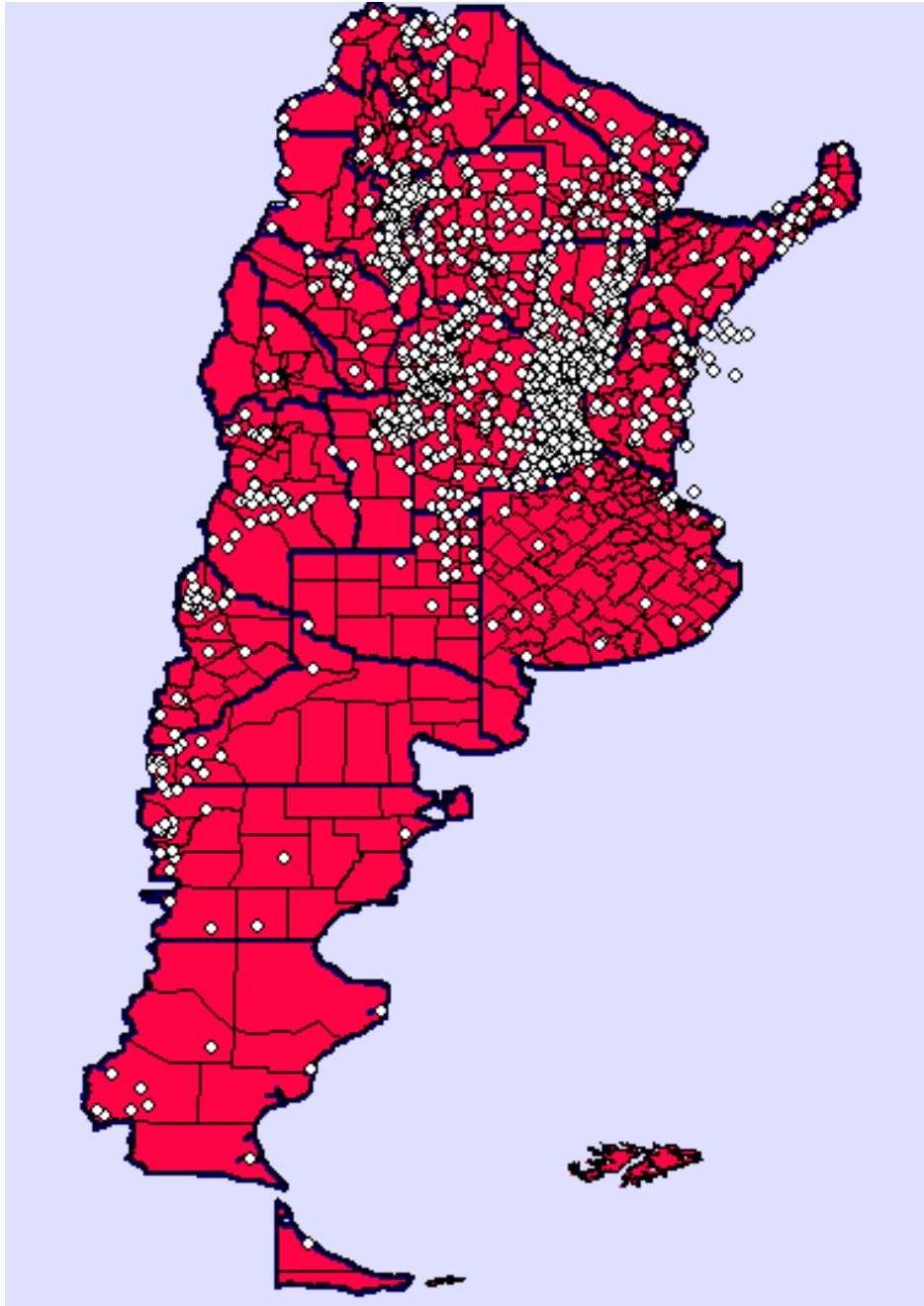
A continuación, se detallan los pasos a seguir para la creación de los archivos.

1. En primer lugar, se debe abrir la base de datos. Para ello, desde el menú *File* se elige la opción *Open* y se selecciona *Database File*.
2. Una vez visualizada la base de datos correspondiente, nuevamente en el menú *File*, se escoge la opción *Export* y se selecciona *Field, X Y to Point Vector File* (Figura 31).



**Figura 31: Cuadro de Diálogo Database Workshop – Export**

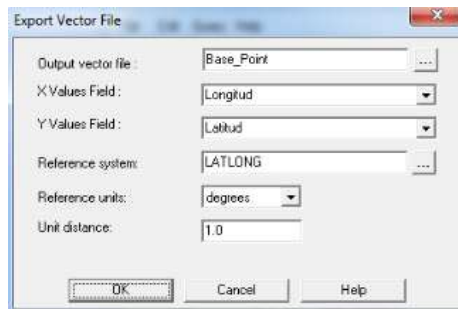
Se genera de esta manera el Mapa con la localización de las estaciones analizadas hasta la fecha en Argentina (Figura 32).




**Figura 32: Mapa con la localización de las estaciones analizadas hasta la fecha en Argentina**

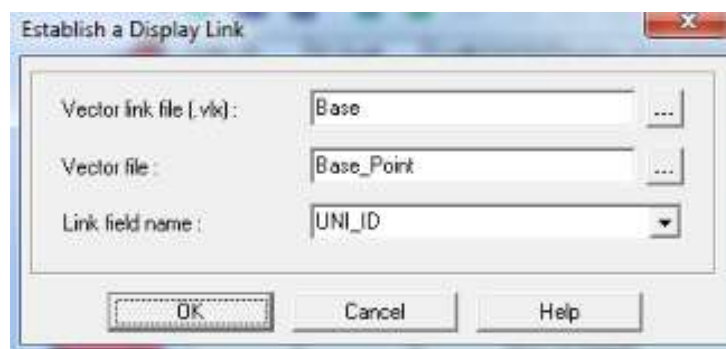
3. Luego se debe abrir el cuadro de diálogo *Export Vector File* (Figura 33). En el presente trabajo se adopta el sistema de coordenadas  $(X, Y)$  de latitud y longitud con el cual se ubican las estaciones pluviométricas. Por esta razón se utiliza el sistema de referencia LATLONG equivalente al WSG1984 y grados como unidades de referencia.





**Figura 33: 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*, (Figura 34).



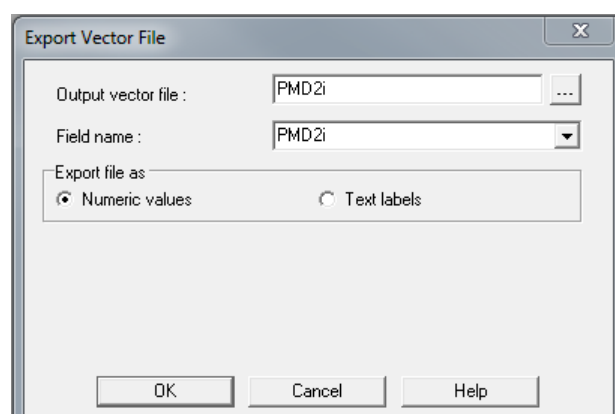
**Figura 34: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link**

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

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

*Link fieldname*: el archivo al cual se hace referencia.

Desde el cuadro *DatabaseWorkshop* se ejecuta la opción *Createrdrisi Vector File*. Aparecerá en pantalla una nueva ventana *Export Vector File* que se debe completar de la siguiente manera (Figura 35):



**Figura 35: 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 36.

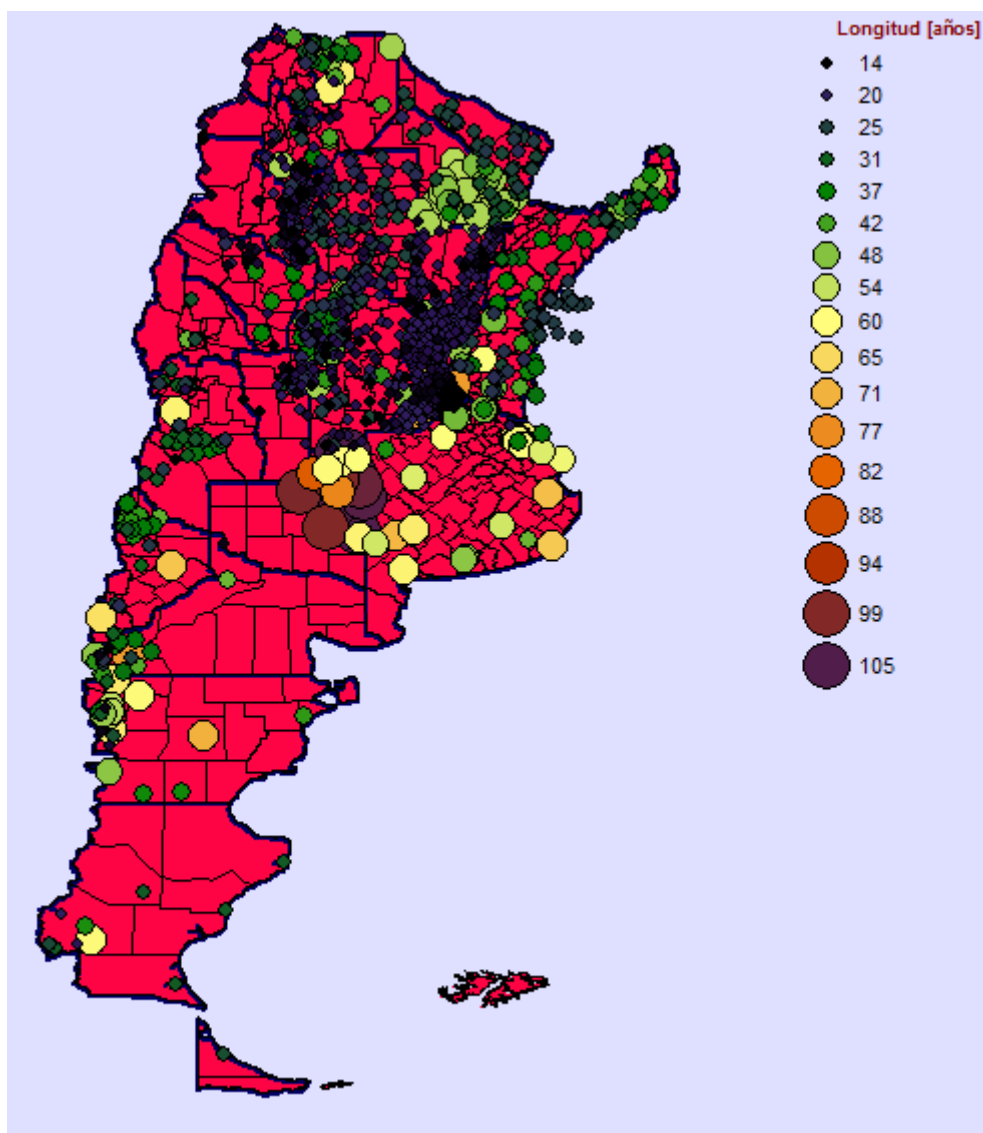


Figura 36: Mapa con la localización y las longitudes de serie en las provincias analizadas hasta la fecha.

#### 6.4. GENERACION DE UNA MASCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACION

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

1. En Autocad se generó la superficie que luego se utilizó como mascara, esta debe ser creada con una polilínea cerrada. Una vez terminada se guardó el archivo en formato “dxf” – “Autocad R12”.

2. Se importó el archivo dxf a IDRISI, a través de la función “File”, “Import”, “Desktop publishingformats”, “DXFIDRISI” (Figura 37 y Figura 38).

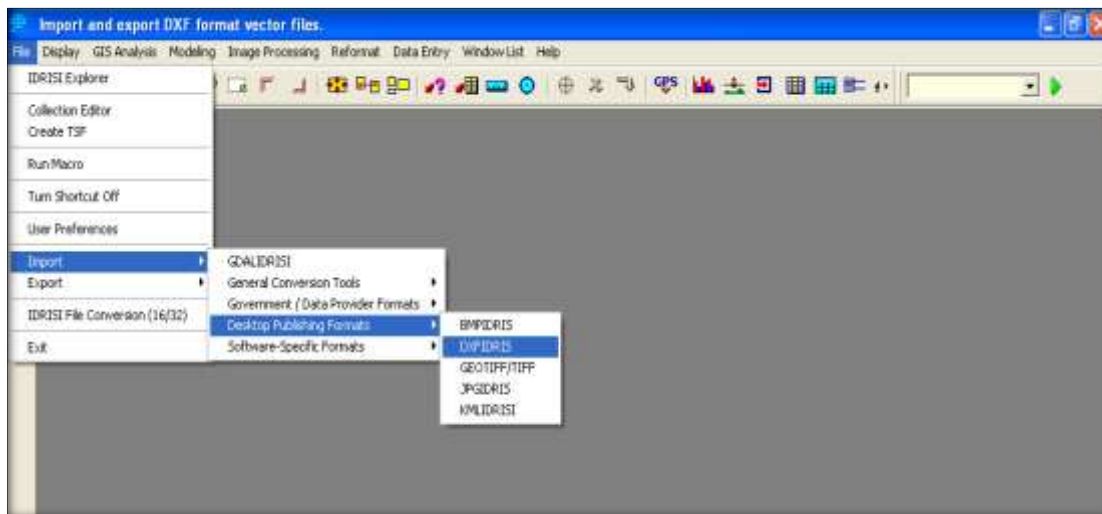


Figura 37: Cuadro de dialogo Import Dxf IDRISI.

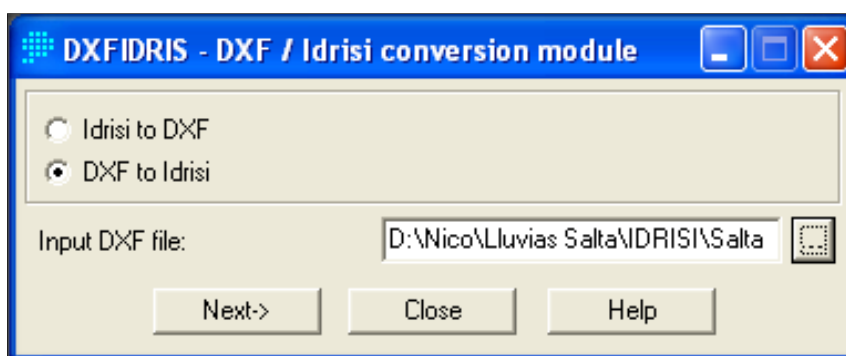


Figura 38: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

3. Se debe describir la configuración de la superficie, como ser *Reference system*, *Reference units*, *Features to extract*. En la Figura 39, se puede apreciar en detalle la metodología.

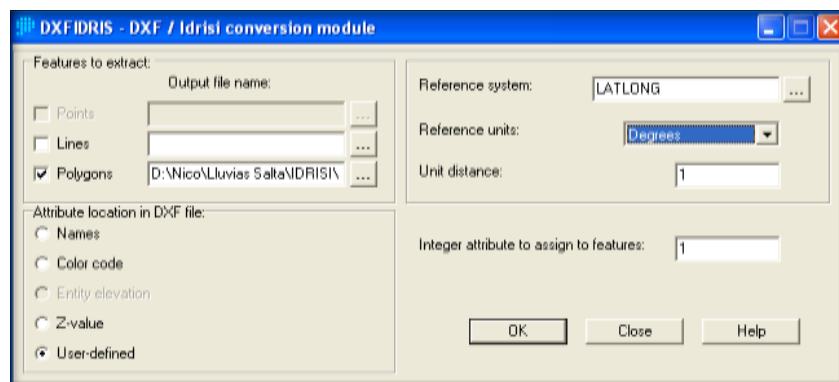


Figura 39: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

4. Luego debo transformar esta superficie que se encuentra como vector en un archivo ráster, para poder ser utilizado en el modelo de Kriging, a través de la opción “Reformat” y “RASTERVECTOR” (Figura 40 y Figura 41).

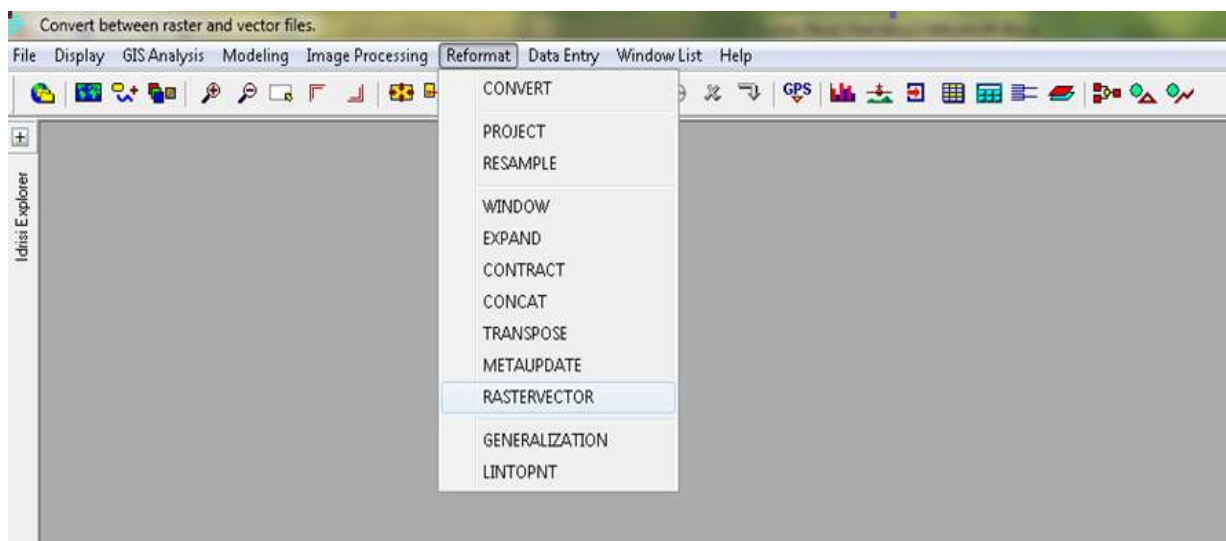


Figura 40: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR

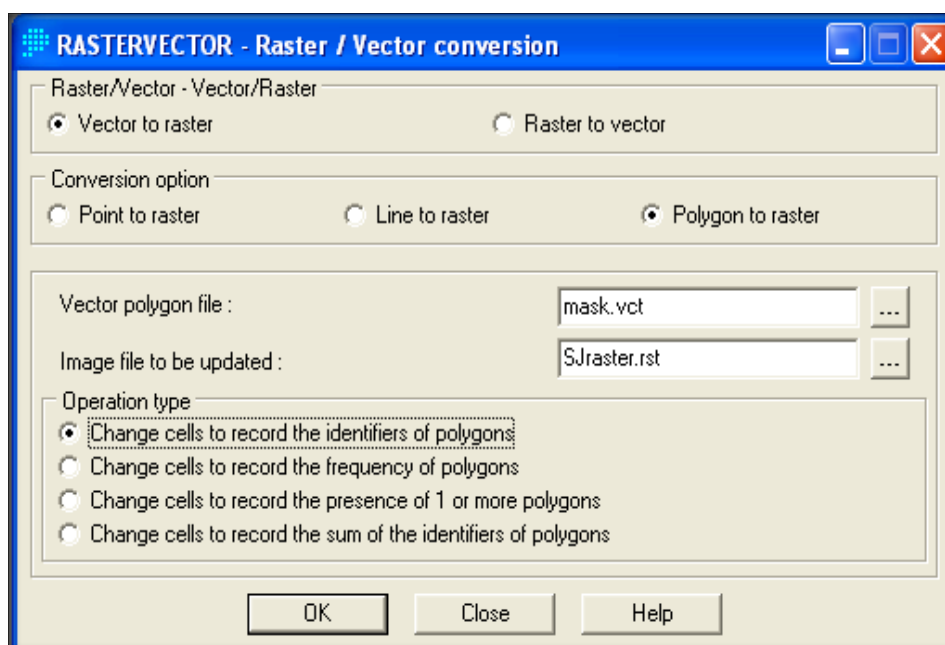


Figura 41: Cuadro de dialogo Raster / Vector Conversión

5. Por último, en la Figura 42, se muestra el formato de salida de la máscara utilizada para las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

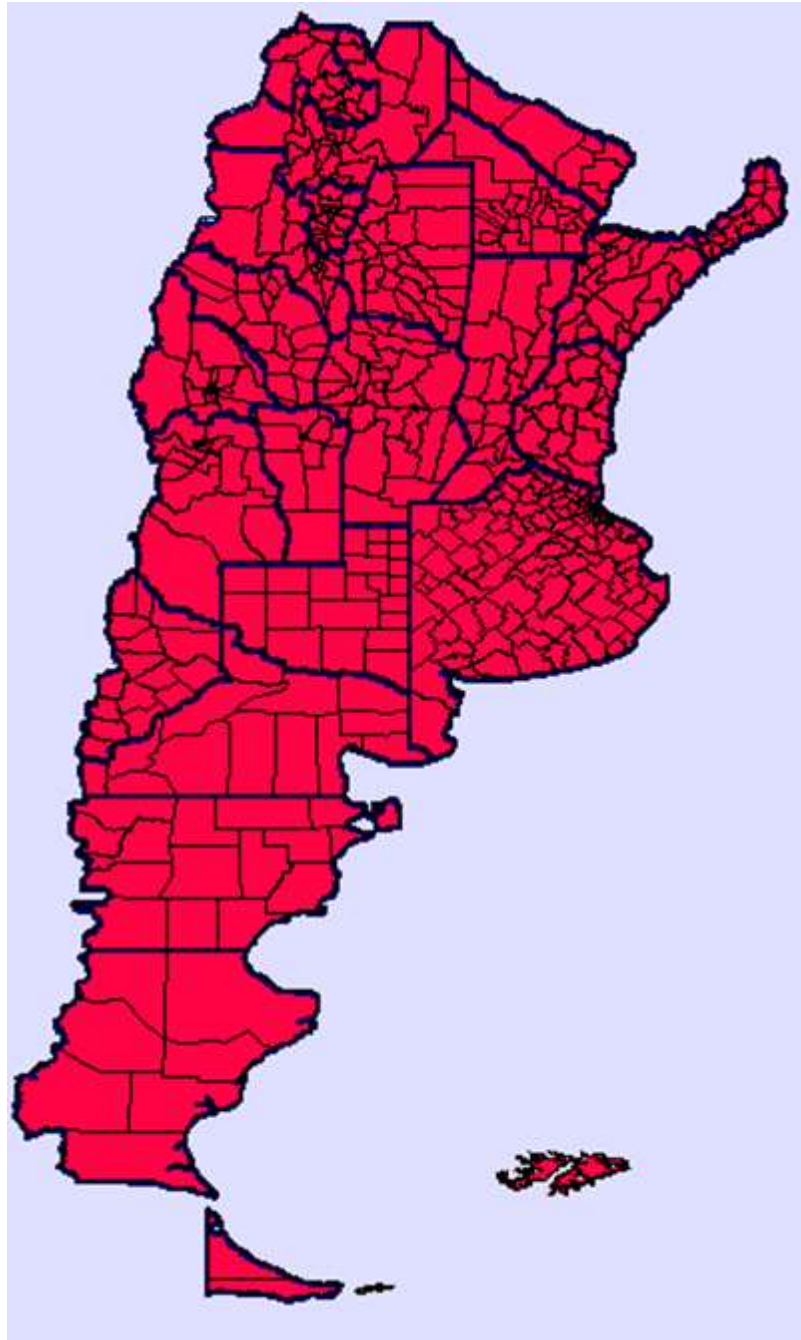


Figura 42: Mascara utilizada para las provincias analizadas hasta la fecha.

## 6.5. METODO DE INTERPOLACION DE KRIGING

El submenú Kriging conduce a tres interfases. En la interface *SpacialDependenceModeler* (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 ráster completas a partir de datos de muestras y desarrollar modelos a través de otras interfaces. 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 antes 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* (Figura 43).
2. En el cuadro de diálogo *Kriging and Simulation* se completarán las opciones (Figura 44).
3. Al usar una máscara se está delimitando el análisis solo a los píxeles que se encuentran dentro de las provincias (Figura 45).

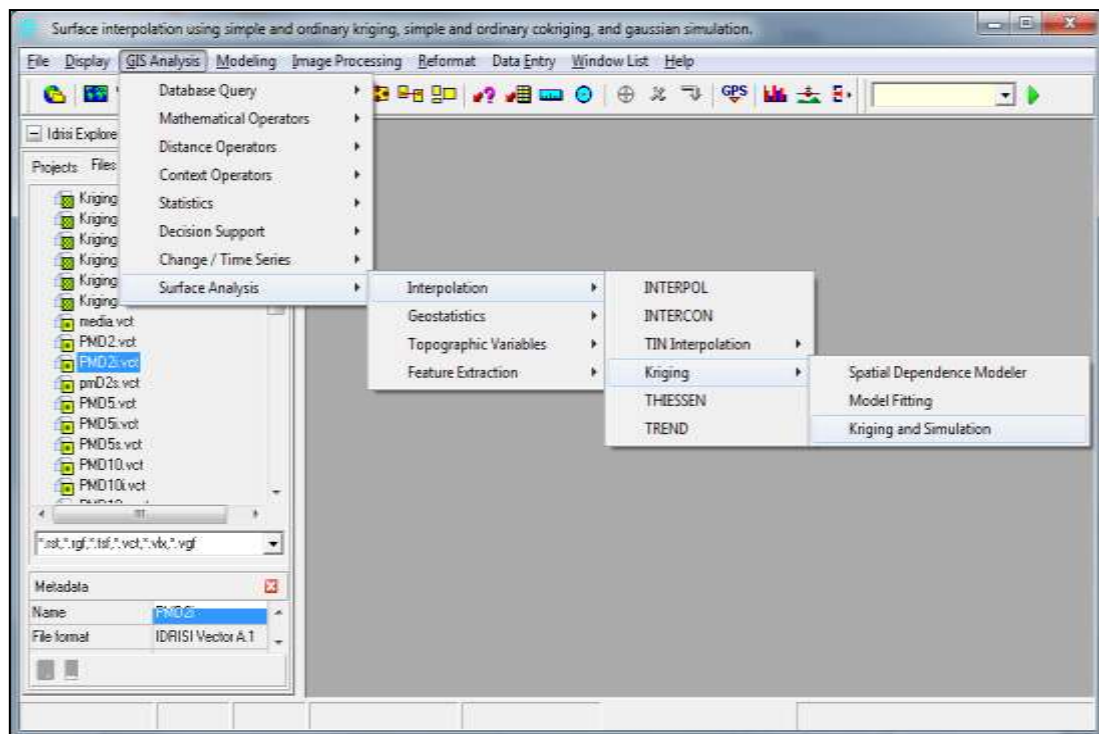


Figura 43: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation

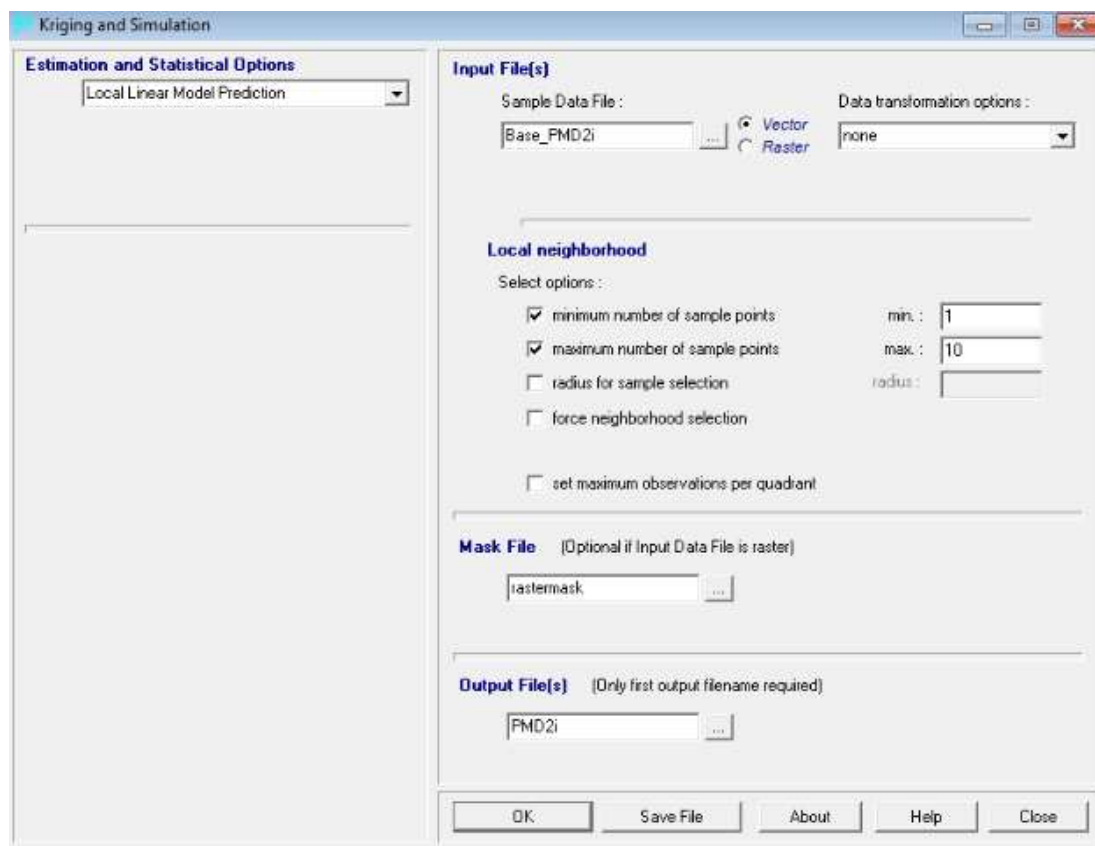
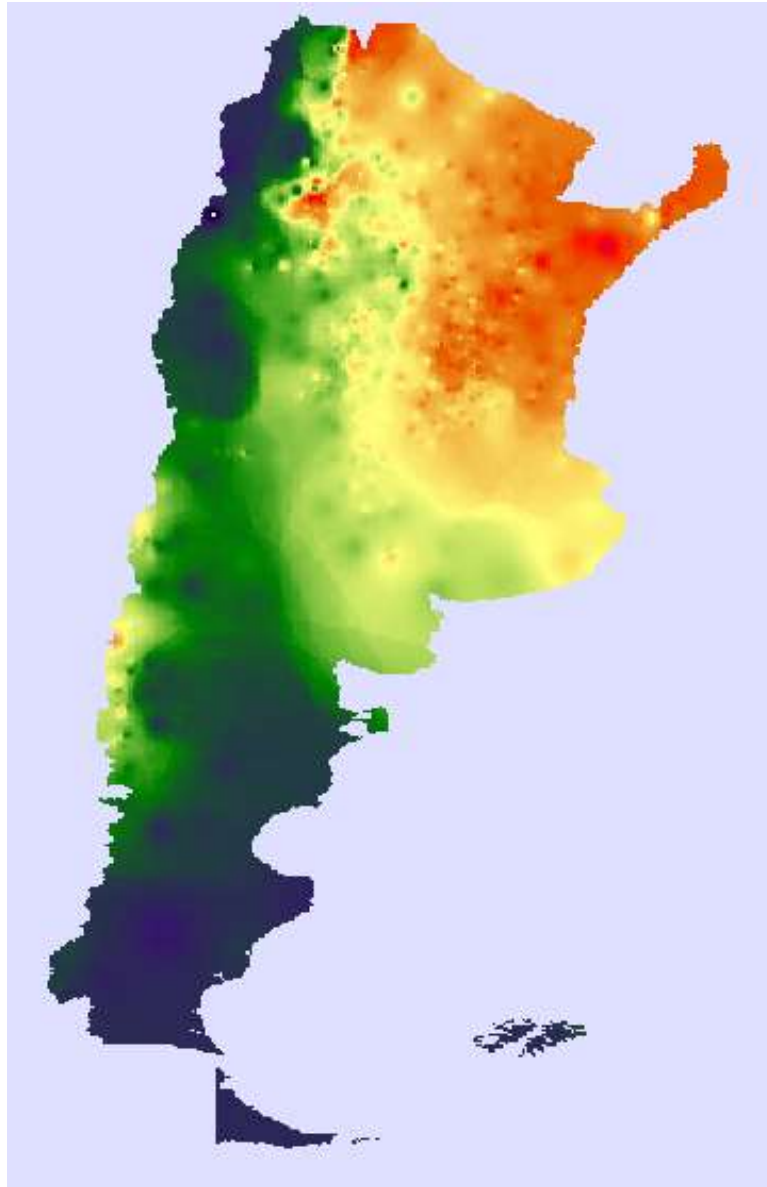


Figura 44: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation



**Figura 45: Raster interpolado por el método Kriging para T=2 años**

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

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



## 6.6. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MAXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.

Por último, desde la Figura 46 a la Figura 52 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados para la totalidad del país.

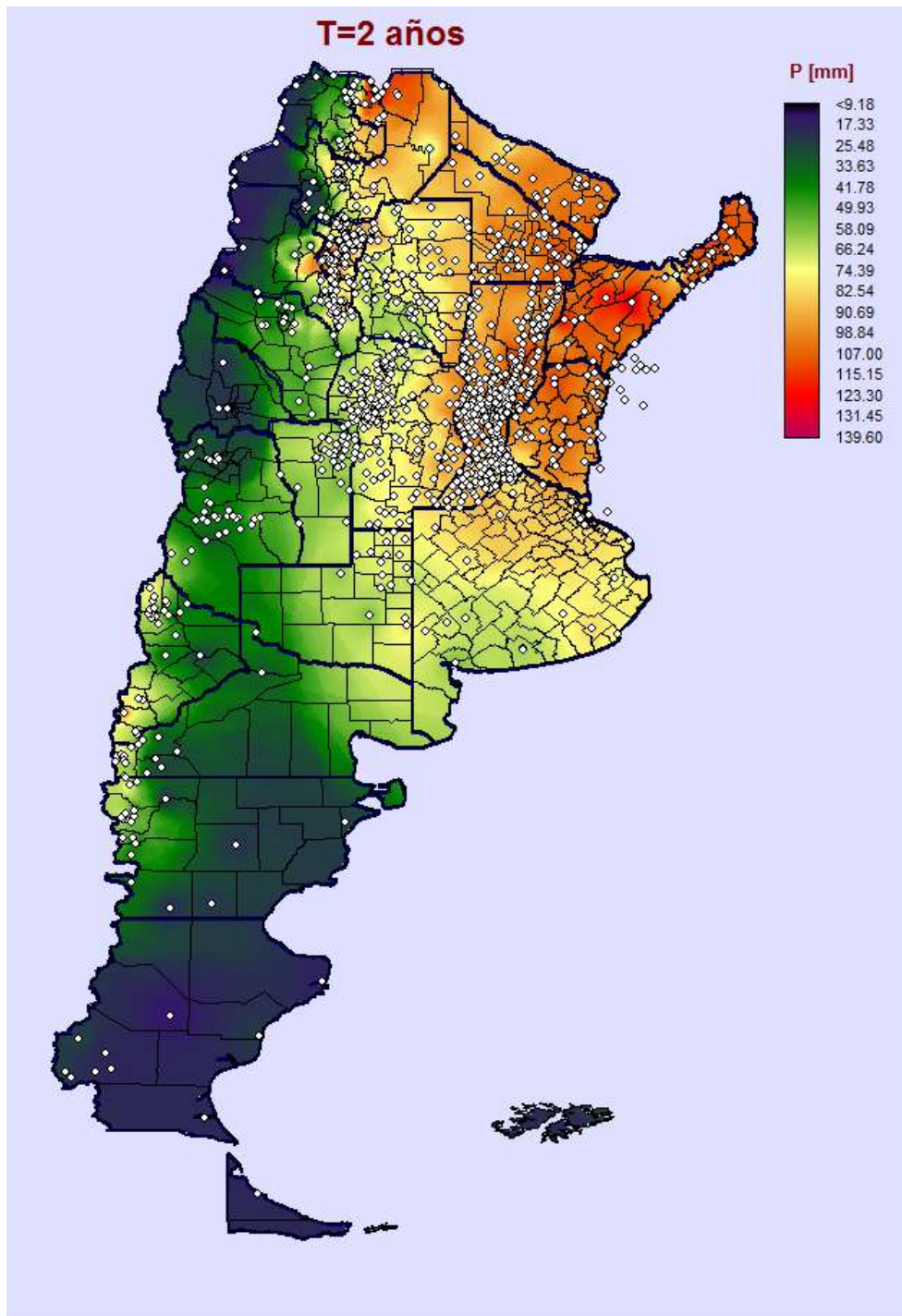
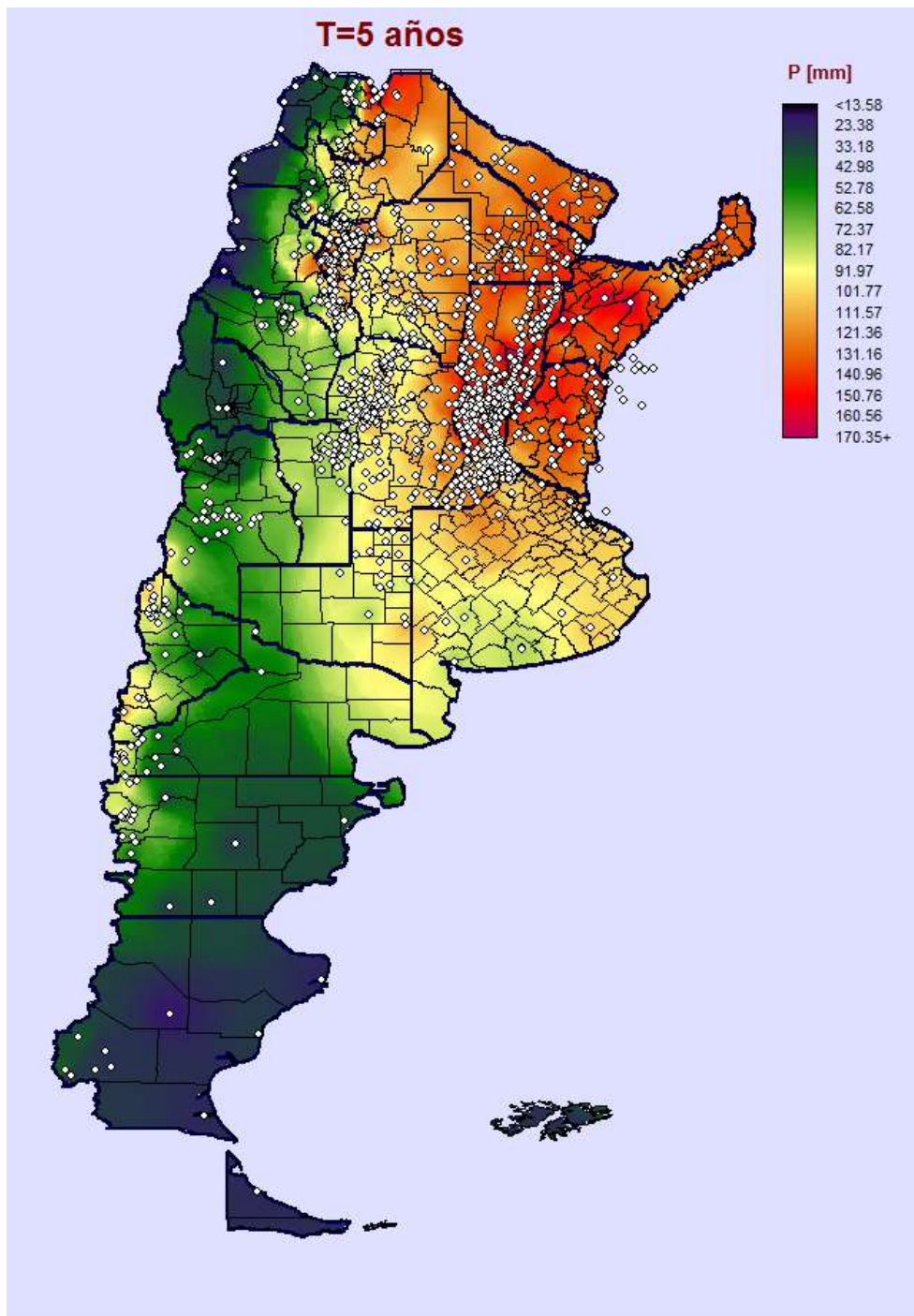


Figura 46: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina para un Periodo de retorno T= 2 años [mm].





**Figura 47: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina un Periodo de retorno T= 5 años [mm]**

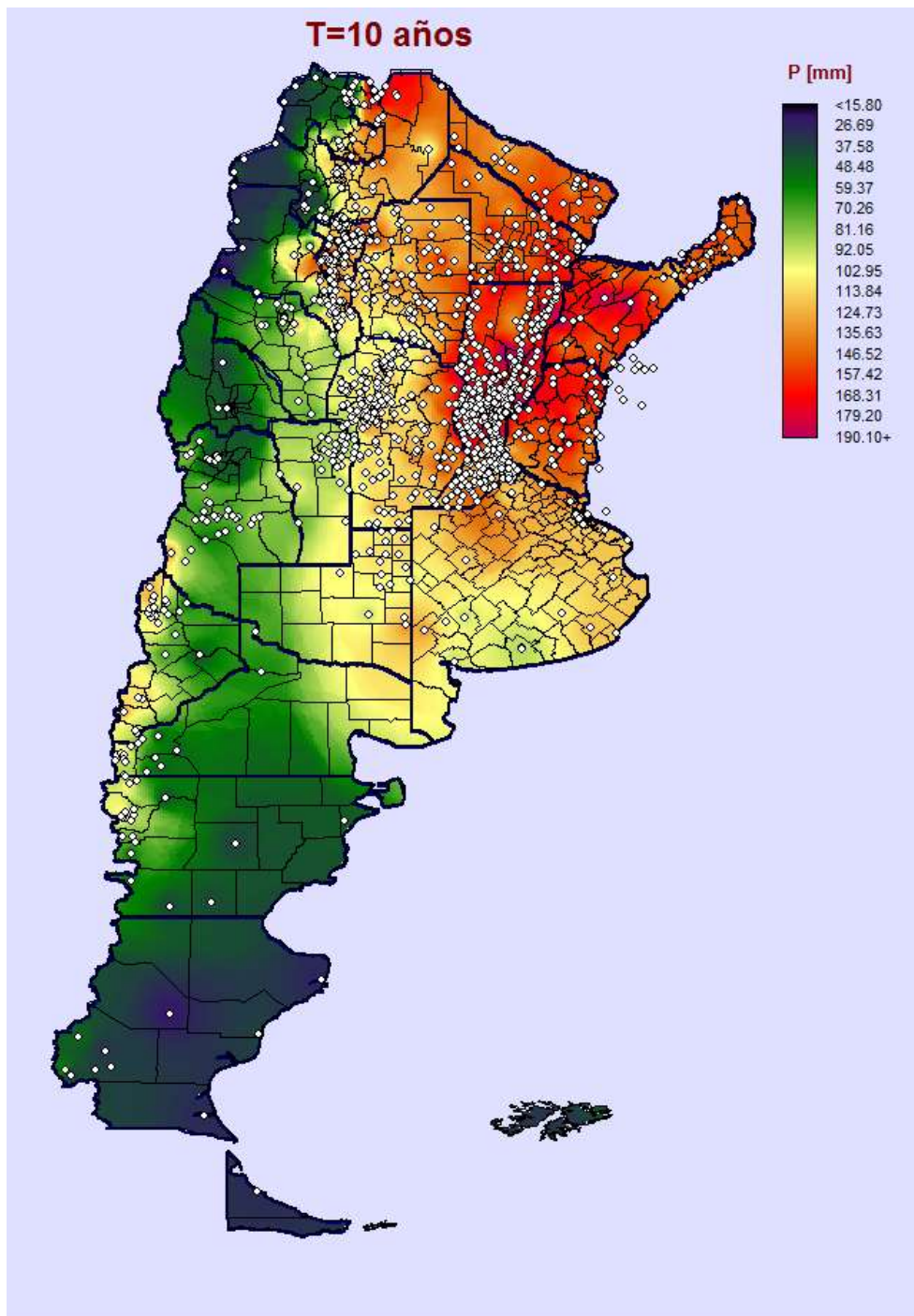


Figura 48: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina para un Periodo de retorno T= 10 años [mm].

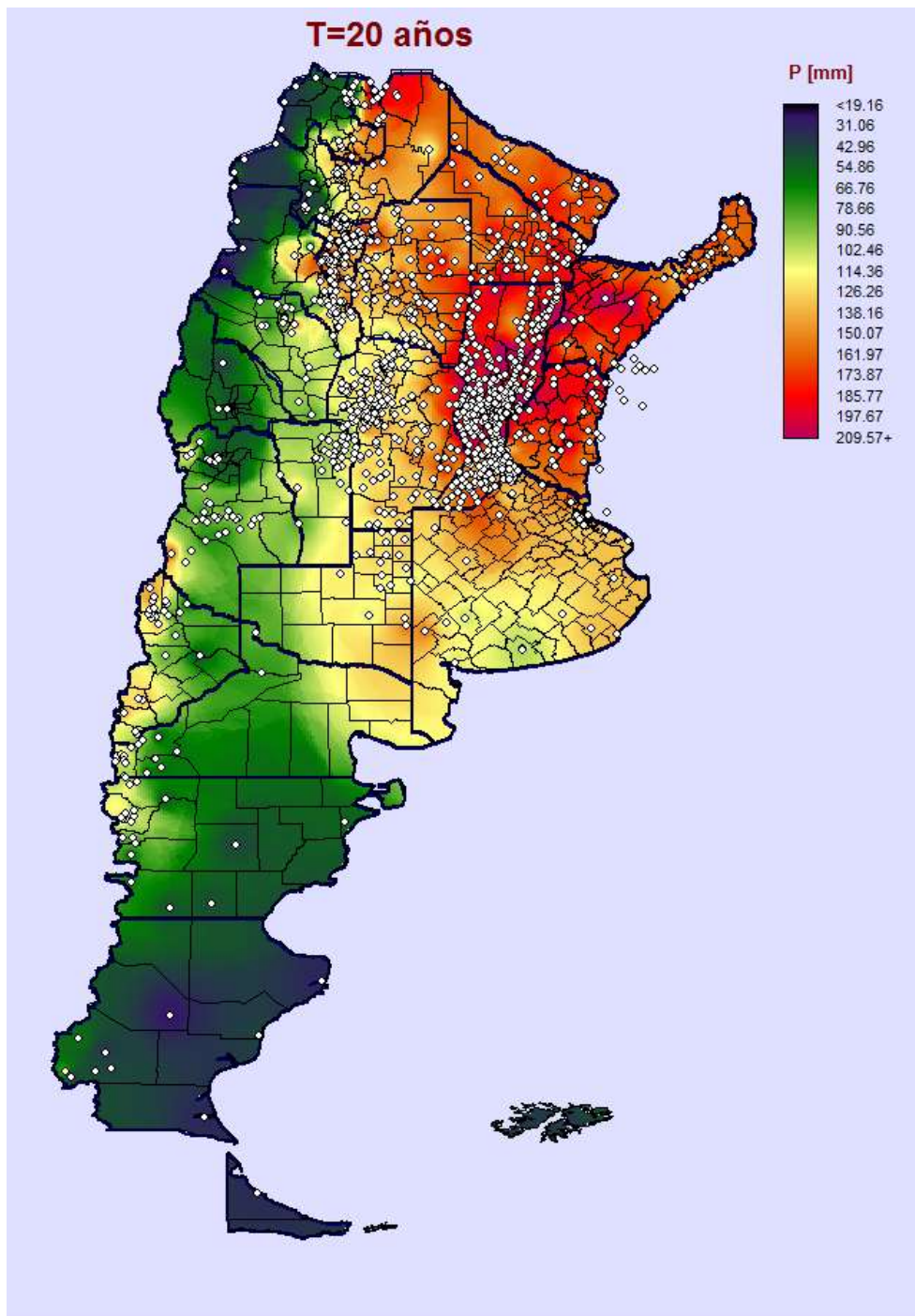


Figura 49: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina para un Periodo de retorno T= 20 años [mm].



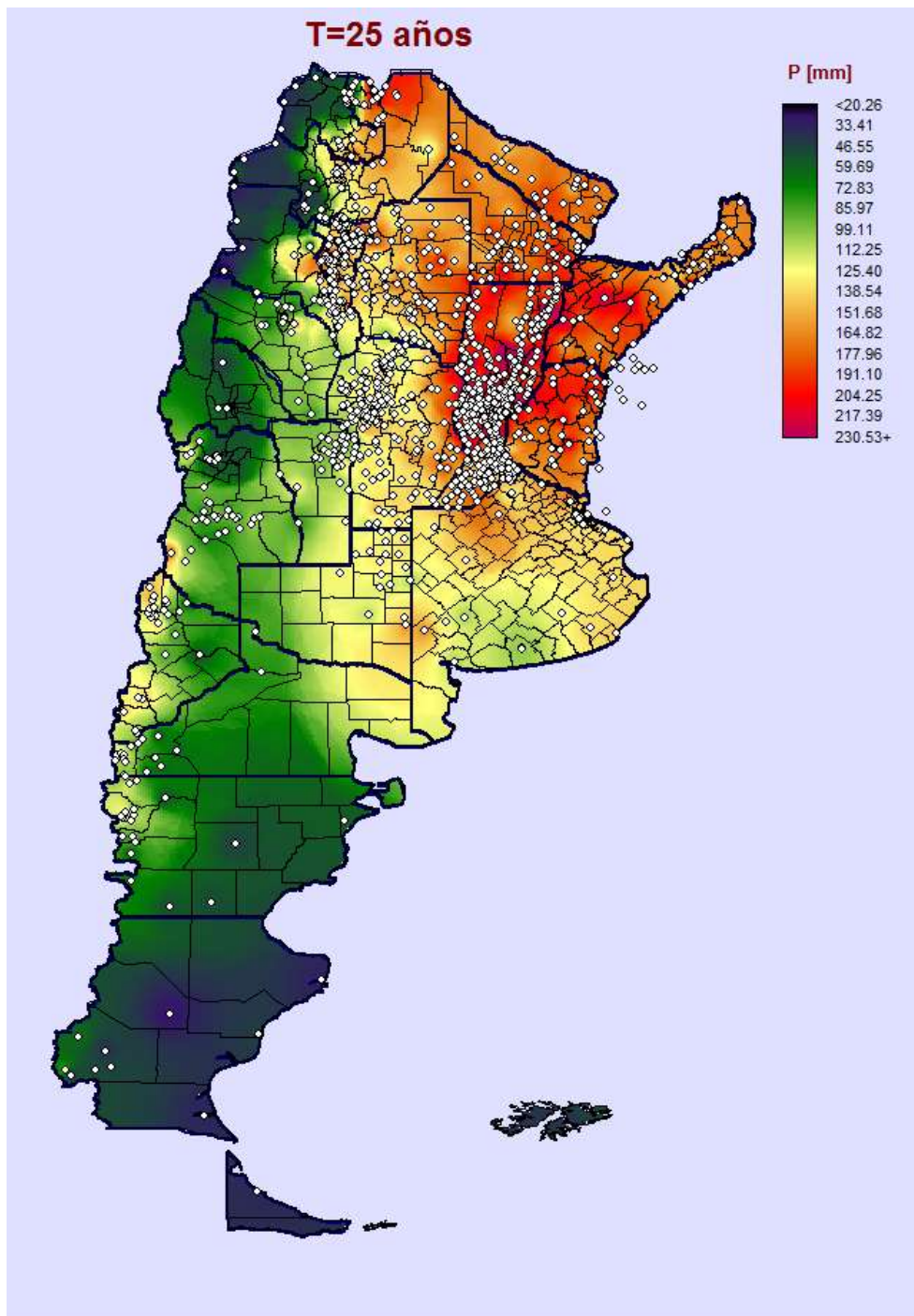
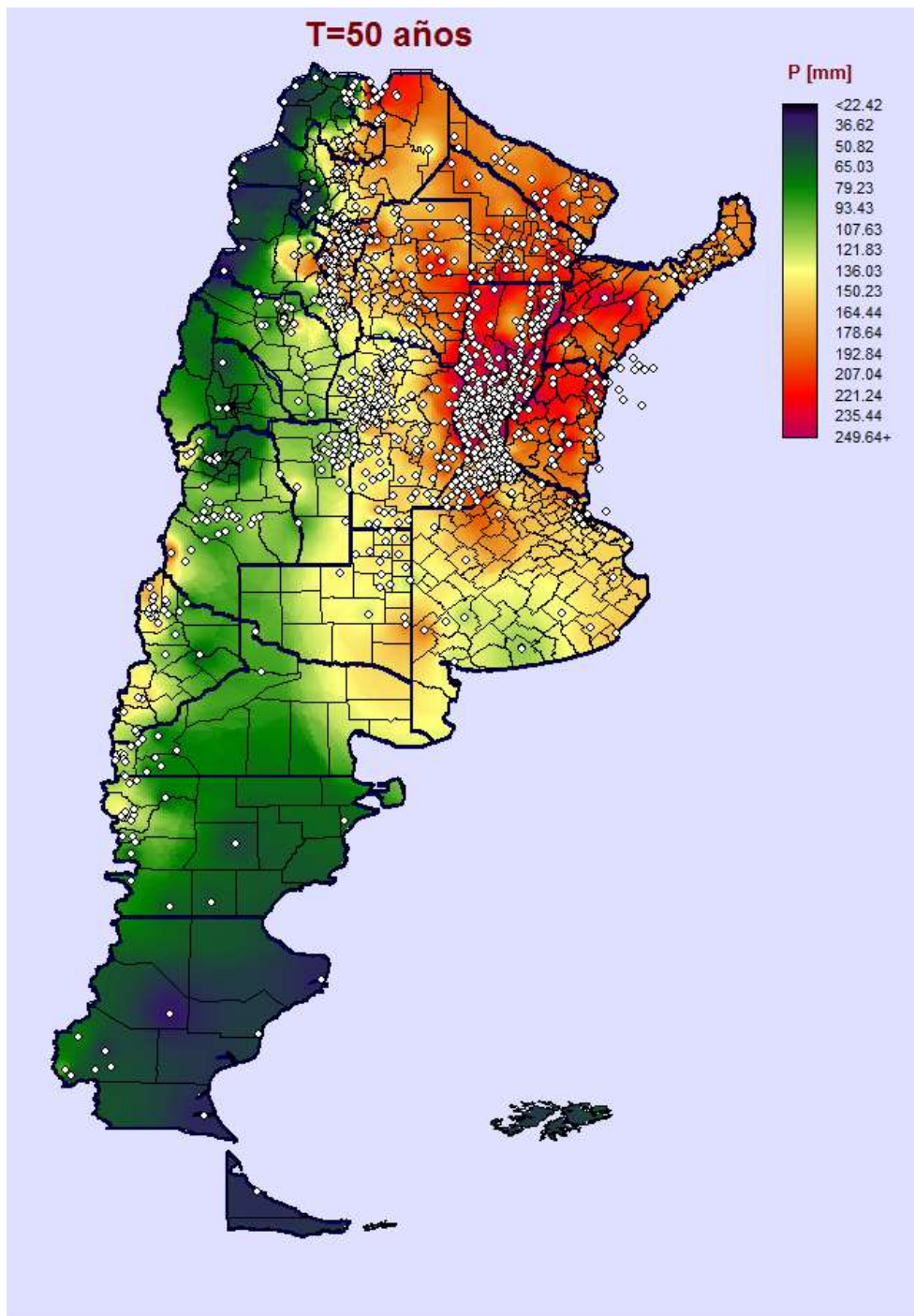
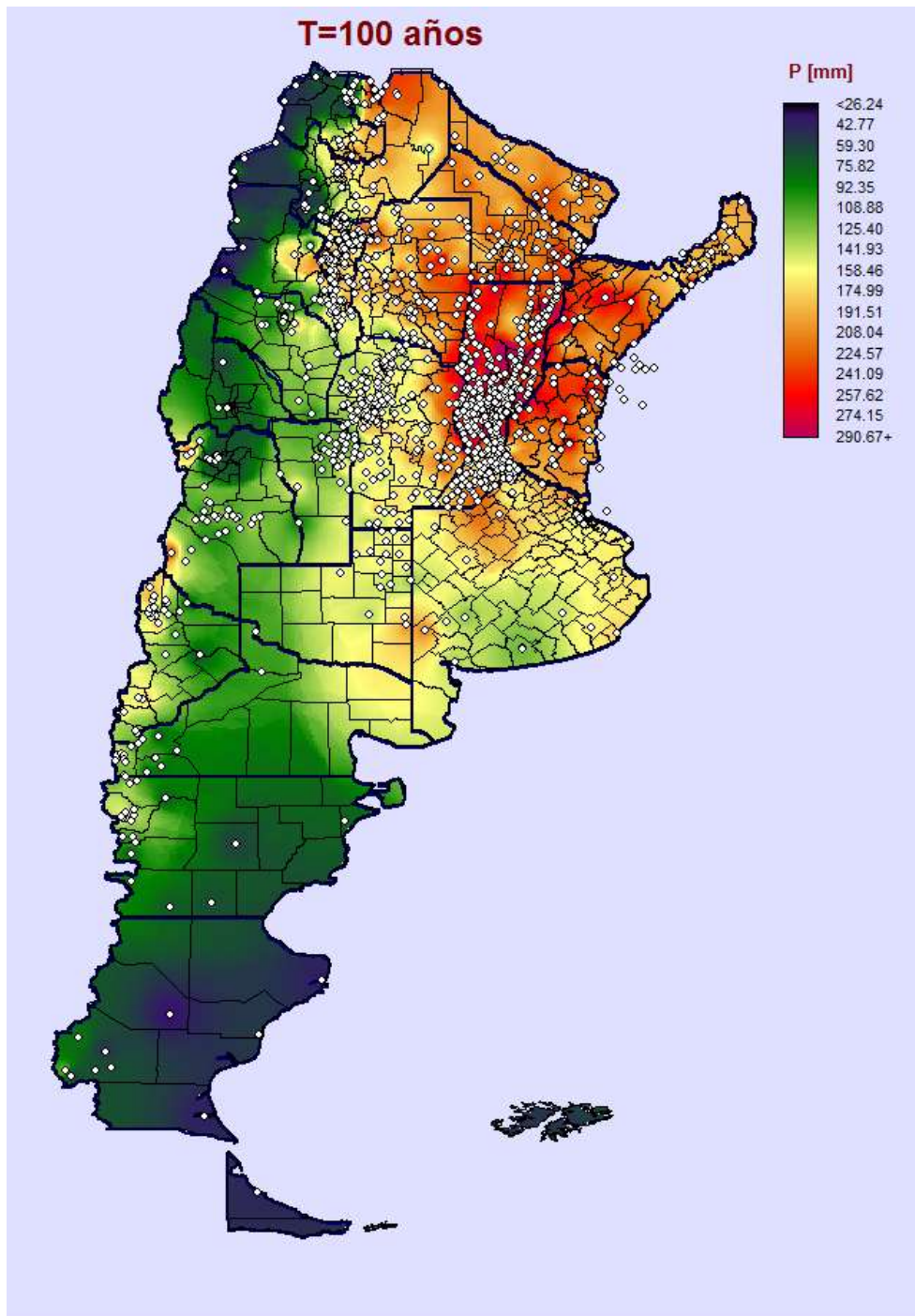


Figura 50: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina para un Periodo de retorno T= 25 años [mm].



**Figura 51: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina para un Periodo de retorno T= 50 años [mm].**



**Figura 52: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de Argentina para un Periodo de retorno T= 100 años [mm].**

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

## **7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se compara la información generada en el Capítulo 6 con los mapas de isohietas medias anuales existentes en las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego. Se cuenta con un mapa de isohietas de precipitación total media anual en la República Argentina provisto por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Si bien la variable (lluvia media total anual) presentada en este antecedente no es la misma que la analizada en este trabajo, lo que se busca es realizar una comparación cualitativa entre ambos mapas (describiendo la evolución espacial).

### **7.2. CONTRASTE ENTRE LOS MAPAS OBTENIDOS Y MAPAS DE ISOHIETAS MEDIAS ANUALES EXISTENTES EN LAS PROVINCIAS DE ESTUDIO**

#### **7.2.1. ANTECEDENTES**

A continuación (Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56), se presentan los mapas de isohietas de precipitaciones medias anuales de las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego respectivamente. Además, dichos mapas cuentan también con información sobre las isotermas medias anuales y tipos de climas en la región. Fuente: Instituto Geográfico Nacional

Un mapa de isohietas está formado por líneas que unen puntos de igual cantidad de precipitación. Se debe tener en cuenta la variación de la precipitación con la altura y toda la información de las condiciones de la zona que se tenga acerca de la lluvia, como ser, morfología de tormentas, circulación de la atmósfera, entre otras. Para la generación de estos mapas de isohietas, lo primero que se hace es localizar las estaciones sobre un mapa. Luego, en cada estación se establece el valor de precipitación y se unen los puntos con igual precipitación en base a los valores registrados en las estaciones. Finalmente se dibujan las líneas de igual precipitación interpolando linealmente los valores de medición entre cada uno de los pares de estaciones.



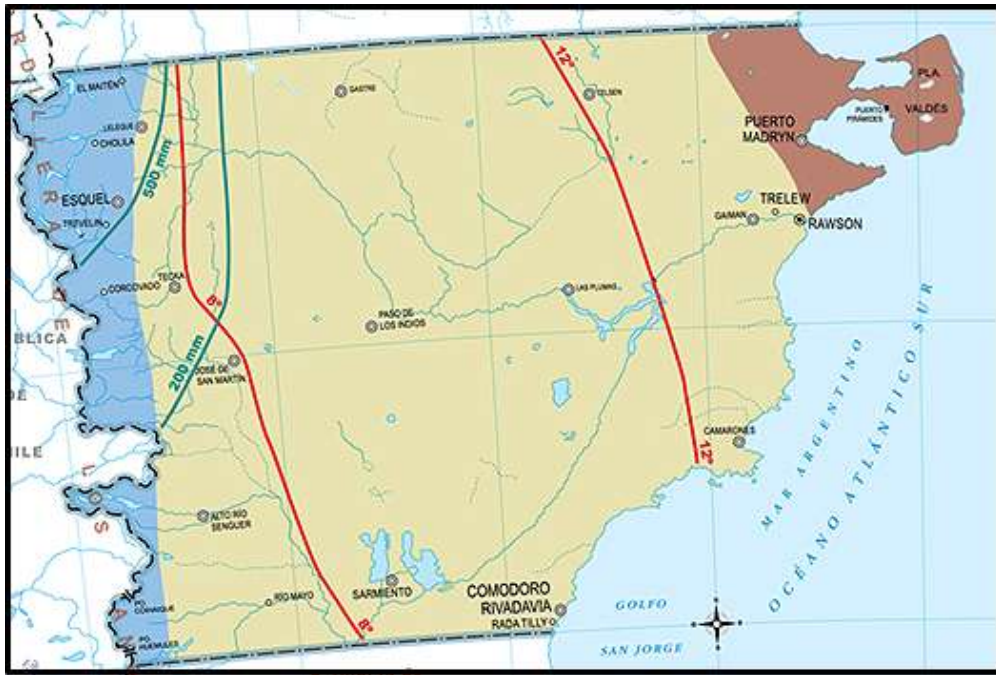


Figura 53: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de la provincia de Chubut.



Figura 54: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de las provincias San Juan.





Figura 55: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de las provincias Santa Cruz.

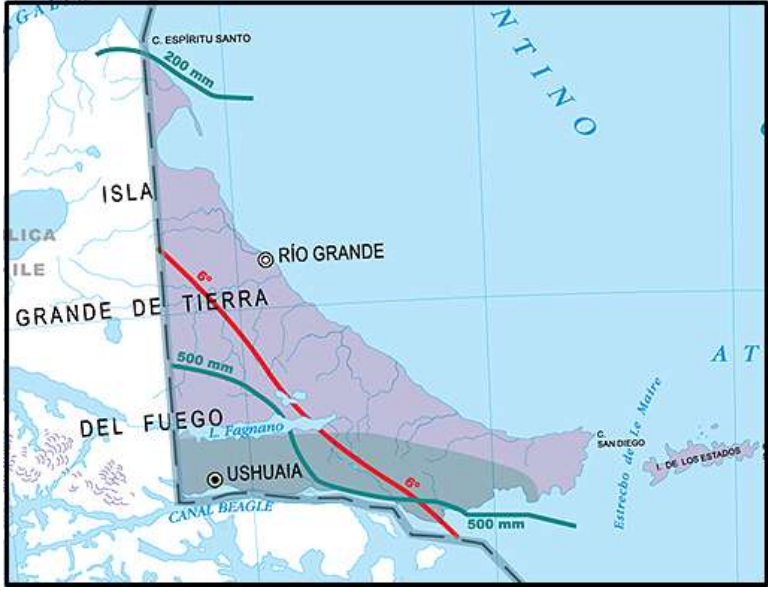


Figura 56: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de las provincias Tierra del Fuego.

En el caso de la provincia de Chubut y Santa Cruz se observa que la precipitación total anual aumenta de Sureste a Noroeste. Siendo el valor igual a 200 mm hacia la zona sur y aumentado hacia la zona norte, cercana al cordón montañoso, viendo una precipitación de 500 mm.

Con Respecto a San Juan, si nos ubicamos en el centro de la provincia vemos que a medida que nos movemos hacia el este u oeste las precipitaciones van aumentando desde 100 mm hasta 300 mm.

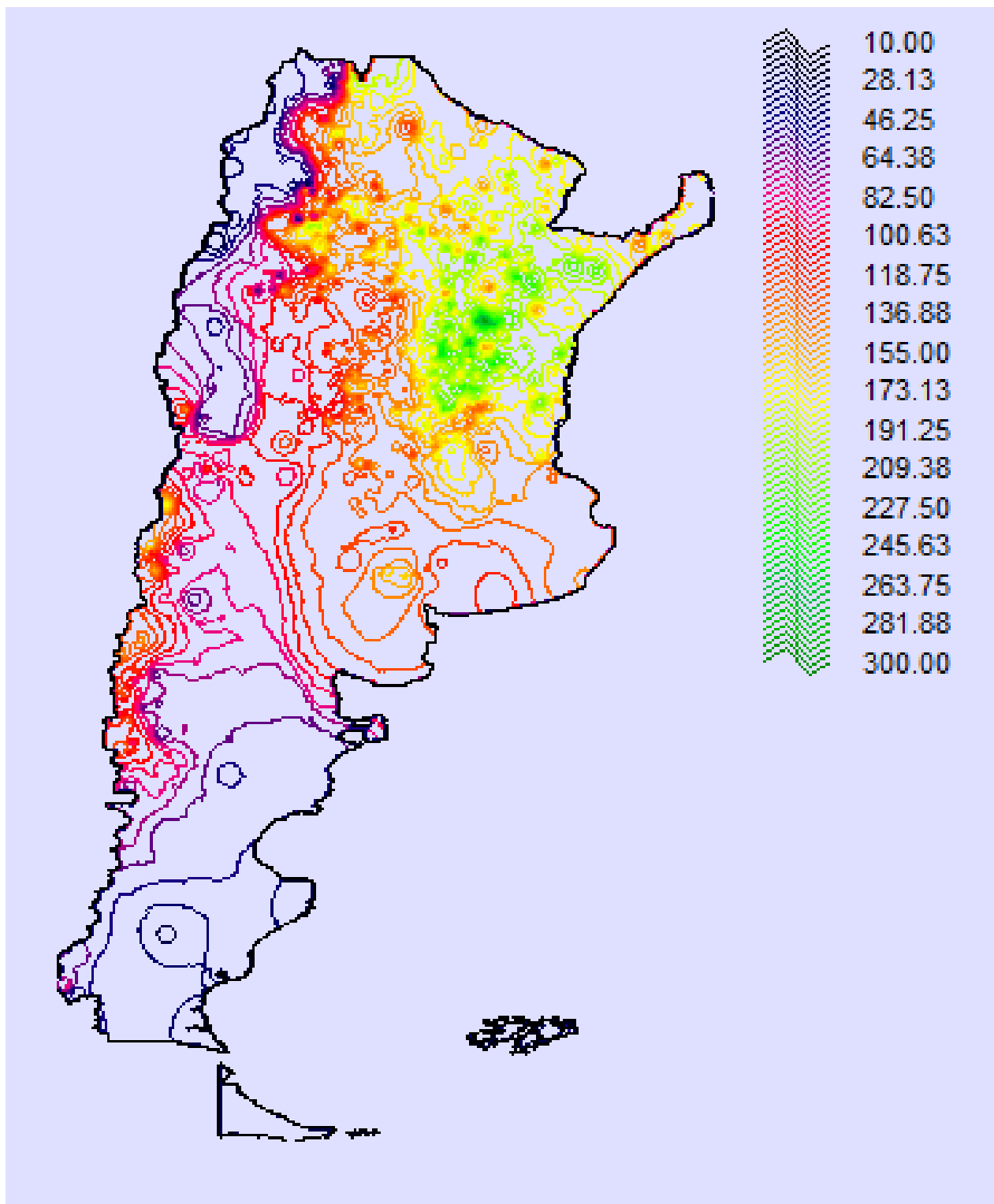
Y, por último, en el caso de Tierra del Fuego encontramos una isohieta de 200 mm en el norte de la provincia que aumenta a medida que descendemos hacia el sur hasta un valor de 500 mm.

### **7.2.2. COMPARACION ENTRE MAPAS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO Y MAPAS DE ISOHIETAS DE LAS PROVINCIAS DE ESTUDIO.**

A continuación, se presenta el mapa nacional de isohietas de lluvia diaria máxima siguiendo la metodología aplicada en este trabajo para los distintos periodos de retorno (el mapa de isohietas a partir de la interpolación de Kriging para una recurrencia ejemplo de 25 años, Figura 57).

Se observa a simple vista que los valores de precipitación máximas diarias asociadas a una recurrencia de 25 años se dan en el Este alcanzando un valor del orden de los 225 mm en las provincias de Santa Fe, Corrientes y Entre Ríos. Luego, las precipitaciones máximas decrecen hacia el Oeste hasta alcanzar valores del orden de los 49 mm en la zona Oeste de Jujuy, Salta y Catamarca. Además, se observa un decrecimiento gradual de norte a sur del país.

Con respecto a las 4 provincias analizadas en este informe se observa lo siguiente: los máximos en Chubut se encuentran al Noroeste en el límite con Chile, y disminuyen, casi en forma gradual, hacia el Sureste. En San Juan puede apreciarse una concentración de los máximos en la zona Sur de la provincia descendiendo hacia la zona Norte de la misma. En Santa Cruz sucede lo mismo que en Chubut, encontrándose los máximos en el Noroeste y descendiendo hacia el Sureste. Y por último en Tierra del Fuego encontramos los máximos en el Oeste descendiendo hacia el Este.



**Figura 57: Mapa de isohietas de precipitaciones máximas diarias obtenidas por el método Kriging estimada para un período de retorno de 25 años a nivel Nacional.**

De comparar esta figura con los mapas de isohietas de precipitaciones totales medias anuales presentados anteriormente, se concluye que si bien los mapas se lograron siguiendo metodologías diferentes y se realizaron partiendo de diferentes variables (en un caso precipitaciones totales medias

anuales y en el otro precipitaciones máximas diarias asociadas a un T=25 años), los resultados finales varían significativamente, comparando las diferencias entre los valores máximos y los mínimos, sin embargo se obtiene una variación espacial similar; y esto valida el trabajo aquí realizado.

### **7.3. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS CON LA METODOLOGÍA PROPIA Y EL MAPA DE ISOHIETAS DE PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA ANUAL EN LA REPUBLICA ARGENTINA PROVISTO POR EL INTA.**

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

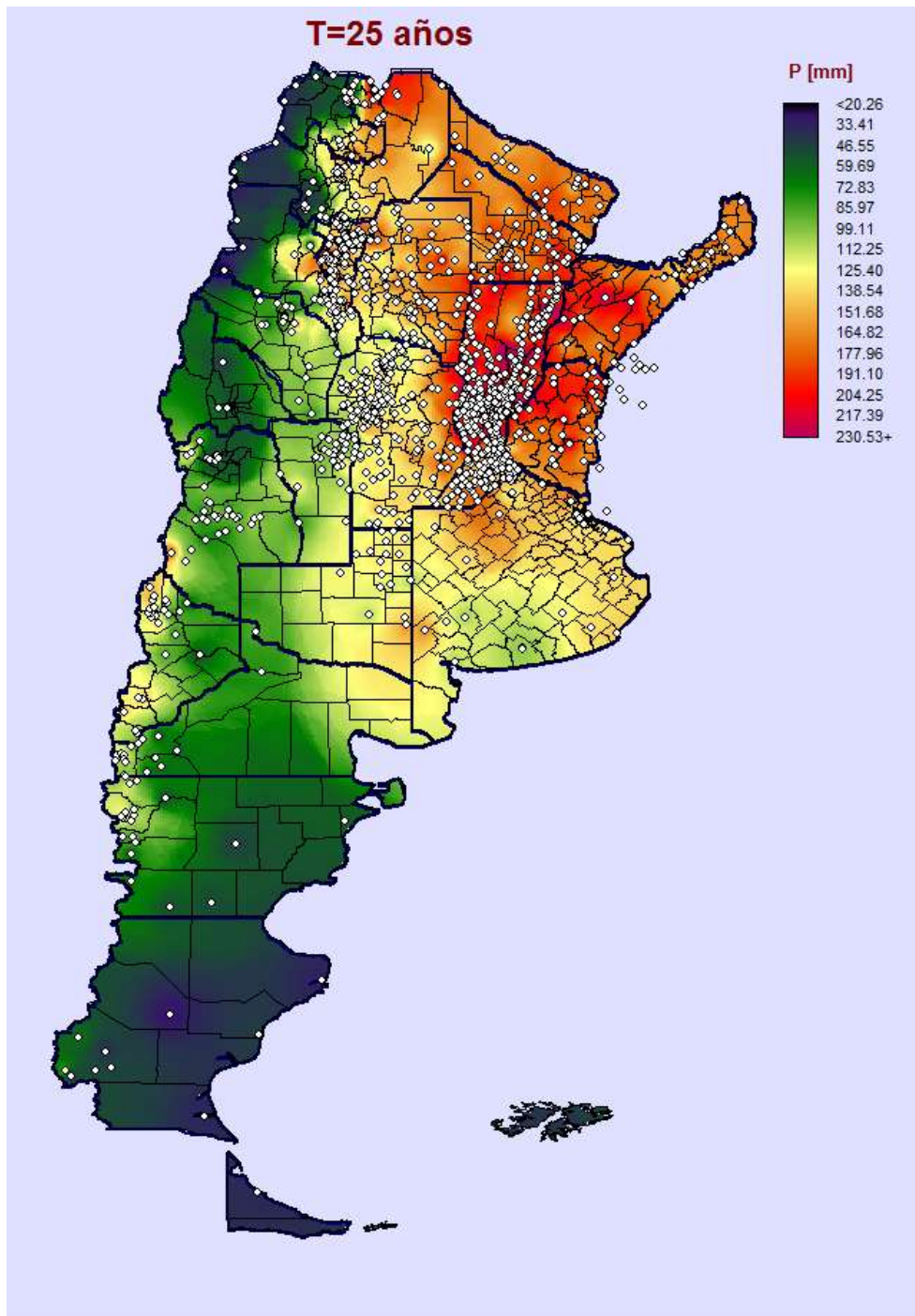
Previamente a la realización de este trabajo, se habían analizado siguiendo la misma metodología que la aquí presentada las provincias de: Córdoba, San Luis, Santa Fe, Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco, Formosa, Entre Ríos, Corrientes, Neuquén, Río Negro, Mendoza, La Pampa. Ahora se busca acoplar la información de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego a las demás provincias previamente trabajadas y así llegar a obtener un mapa a nivel nacional.

Se compararán dos series de mapas: los realizados en el capítulo 6 de este trabajo junto a los de las demás provincias analizadas hasta el momento con el mapa de isohietas de precipitación total media anual en la República Argentina provisto por el INTA.

A continuación, en la Figura 58 se muestra el mapa de las provincias analizadas previamente a la realización de este trabajo para una recurrencia ejemplo de T=25 años.

De este mapa se observa que los máximos valores de precipitación se dan hacia el Noreste de la República Argentina, y estos valores van disminuyendo a medida que nos acercamos a la cordillera, es decir hacia el Oeste del país.

Las provincias de Santa Fe, Chubut y Córdoba presentan una elevada densidad de Estaciones Meteorológicas, las cuales ayudan a estudiar con más precisión las cuestiones climáticas. Dado que se registran elevadas precipitaciones en dichas provincias es conveniente que se midan permanentemente las lluvias diarias, por ejemplo, logrando con la ayuda de herramientas computacionales un estudio más profundo del tema.



**Figura 58: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de las provincias analizadas hasta la fecha para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]**

Respecto a la zona de análisis, observamos que al noroeste de la provincia de Chubut aparecen los máximos, limitando con Rio Negro y luego disminuyen hacia el este; también es notable la poca concentración de estaciones distribuidas en general en las provincias. Chubut, Santa Cruz y Tierra del fuego se caracterizan por ser provincias con precipitaciones bajas en comparación con otras provincias de Argentina como Santa Fe o Corrientes, concluyendo en que la zona de mínimos se ubica en el sur del país.





## 8. CONCLUSIONES.

### 8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.

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

1. Se recopilaron y procesaron registros de 72 estaciones pluviométricas en la región de estudio (Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego).
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones de las provincias de estudio.
3. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de al menos 33 estaciones verificaron estas pruebas.
4. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verificó que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativa que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
5. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva 17.00.
6. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de importantes fluctuaciones en el espacio.
7. Se crearon mapas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.
8. Al comparar los mapas obtenidos con este trabajo con antecedentes anteriores, se obtuvieron importantes conclusiones:
  - a) Los máximos en Chubut se encuentran al Noroeste con valores de 149 mm en el límite con Chile, y disminuye, casi en forma gradual, hacia el Sureste con un valor de 57 mm.
  - b) En San Juan puede apreciarse una concentración de los máximos en la zona Sur de la provincia con valores de 49 mm, descendiendo hacia la zona Norte de la misma hasta valores de 27 mm.
  - c) En Santa Cruz sucede lo mismo que en Chubut, encontrándose los máximos en el noroeste y descendiendo hacia el sureste con valores que van desde 75 mm hasta 37 mm.
  - d) En Tierra del Fuego encontramos los máximos en el oeste con valores de 52 mm descendiendo hacia el este hasta alcanzar valores de 34 mm.

- e) Se observa el mismo comportamiento que el descrito anteriormente en cada provincia en los mapas de isohietas recopilados. La falta de datos proveniente de la escases de estaciones en las provincias dio menos valores registrados, aun así se logró obtener un resultado lógico al realizar el mapa en conjunto con las demás provincias analizadas en trabajos anteriores.
- f) Si ahora se analizan las provincias de Chubut, San Juan, Santa Cruz y Tierra del Fuego y se construyen los mapas de precipitaciones máximas diarias asociadas a distintas recurrencias y se los compara con el mapa de isohietas de lluvia total media anual en la República Argentina provisto por el INTA, se puede ver que si bien en este último mapa no se muestra la misma variable que la analizadas en este trabajo (sino una que está relacionada), se observa el mismo patrón de precipitaciones, encontrando lo siguiente: valores que aumentan de Sur a Norte y de Este a Oeste en el Sur país, mientras que en el Norte sucede lo contrario, encontrando valores de precipitación que aumentan de Oeste hacia el Este.
- g) Respecto al año hidrológico para el caso de las provincias de Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego se tomó desde enero a diciembre. Con respecto a la provincia de San Juan se tomó el año hidrológico de Julio a Junio. Esto se definió así para que los máximos se presenten en la zona central, ya que en nuestro país se tiene como tendencia las lluvias máximas en época Mayo a agosto en la zona sur y en la zona céntrica de diciembre a febrero. En las 4 provincias se tuvieron años hidrológicos en donde se tenía ceros en la época de lluvia máxima o más de la mitad de los años nulo. Estos fueron descartados al considerarse como un error en la medición o falta de medición.

## 8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.

A nivel personal encontré muy productivo el poder participar en este proyecto, debido a que sirvió para afianzar conceptos adquiridos a lo largo de la carrera y haberlos aplicado mediante métodos adecuados, así como también adquirir experiencia por la utilización de distintos programas, tales como, FACETA e IDRISI Selva 17.00, los cuales servirán para la aplicación en la vida profesional.

Por otra parte, la satisfacción de haber tenido la oportunidad de colaborar en un proyecto conjunto, el cual podrá ser muy beneficioso en cuanto al desarrollo de obras hidráulicas a nivel país. Es por ello que me gustaría agradecer la colaboración, dedicación y enseñanza de los tutores, tanto a nivel personal como profesional brindando sus conocimientos técnicos, que fueron de gran utilidad para lograr los objetivos propuestos en este trabajo.



### 8.3. TRABAJOS FUTUROS.

- ❖ Actualización de la información pluviométrica en la región de estudio, densificación de la red de estaciones disponibles e instalación de estaciones en las zonas donde hay ausencia de las mismas.
- ❖ Aumentar las bases de datos de lluvias en todo el territorio nacional, siendo esto de gran importancia debido a que se pueden lograr herramientas que en la vida profesional de un ingeniero son muy importantes y necesarias.
- ❖ Generación de una plataforma para acceder desde la web a la información generada.
- ❖ Concientizar a las autoridades responsables de que la investigación es un motor para la creación de herramientas que pueden satisfacer las necesidades de la población actual y futura.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

- ❖ Aldonza, Juan (2016). “Regionalización de Lluvias máximas diarias en las provincias de Entre Ríos”. Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ❖ Bianchiotti, Bernabé (2012). “Análisis de la Precipitación Máxima Probable a través de un Sistema de Información Geográfica”. Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.
- ❖ Bonaterra, Héctor (2016). “Regionalización de Lluvias máximas diarias en las provincias de Corrientes”. Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ❖ Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003) “Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias”. CONICET. Universitas-Editorial Científica Universitaria. Córdoba, Argentina
- ❖ Caamaño Nelli, Gabriel; García Carlos Marcelo; Dasso Clarita (1998). “Zonación de Tormentas de Diseño para las provincias de Córdoba, Argentina.” II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII CNAgua, Tomo 2, 168-178. Santa Fe, Argentina.
- ❖ Calderoni Nahuel (2014). “Regionalización de Lluvias máximas diarias en las provincias de Chaco y Formosa”. Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ❖ Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel y Dasso, Clarita, compiladores (2011) “Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina”. 284 páginas. ISBN13: 978-3-8454-9722-8. Edit. Acad. Española (Lap Lambert Publishing GMBH & Co. KG). Saarbrücken, Deutschland.
- ❖ Chow, Ven T. (1959), Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill, 680 p.
- ❖ Fuentes, Verónica (2018). “Regionalización de Lluvias máximas diarias en las provincias de Mendoza y La Pampa”. Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ❖ García, Carlos Marcelo (1994). “Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en las provincias de Córdoba”. Trabajo Final de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- ❖ Guillén, Nicolás Federico (2014). “Estudios avanzados para el diseño hidrológico e hidráulico de infraestructura hídrica” – Tesis de Maestría – Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención recursos hídricos - Centro de Estudios y Tecnología del Agua

- ❖ Idrisi Selva – Versión 17.00. Clark Labs, Clark University. 950 Main Street, Worcester MA 01610-1477 USA
- ❖ Lérica, Gastón y Sánchez, Ezequiel (2011). “Estudio Metodológico para la determinación de una Grilla i-d-T consistente a nivel Provincial”. Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.
- ❖ Maidah, Andrea Lorena (2010). “Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al estudio de Lluvias Diarias.” Tesis de Grado de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Córdoba.
- ❖ Piazzoni, Gino Luis (2017). “Regionalización de Lluvias máximas diarias en las provincias de Neuquén y Rio Negro”. Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ❖ Rühle, Federico G. O. (1966). “Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas”. La Ingeniería, Nº 987. Centro Argentino de Ingenieros. 2ª edición. Chubut.
- ❖ Weibull, W. (1951), “A statistical distribution function of wide applicability”, J. Appl. Mech.-Trans. ASME 18 (3): 293–297.
- ❖ Extractos de página web de la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC).