



ANEXO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACION DE AGUAS LLUVIAS

I. INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de los recursos hídricos es crucial ante el avance inminente del cambio climático junto al fuerte crecimiento demográfico mundial. Los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs) son una solución sostenible para recolectar y utilizar agua proveniente de fenómenos pluviales, siendo esencial en estos la determinación de la precipitación de diseño para dimensionar adecuadamente las infraestructuras bonificadas por la Comisión Nacional de Riego (CNR).

Este anexo guiará al usuario en el **cálculo de la precipitación de diseño mediante la distribución de probabilidad de Gumbel** (adecuada para la modelación de eventos extremos o particulares de lluvia) y la **determinación del volumen del sistema de acumulación**. Para ello, se utilizan series de datos obtenidos de la plataforma **Mawün**, la cual corresponde a un explorador de estimaciones de precipitaciones, que ofrece información precisa sobre patrones de lluvia modelados en diversas regiones de Chile.

La plataforma Mawün, desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), integra datos de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC); y proporciona información sobre precipitación en un producto grillado de todo el territorio continental del país. Además, integra funciones relevantes para realizar análisis climáticos. Su accesibilidad y herramientas analíticas permiten a investigadores y planificadores realizar estudios estadísticos y visualizaciones útiles para distintos diseños de obras.

Para lograr el diseño de los SCALLs, el presente documento se divide en 4 ejes principales:

- 1) Fundamentos teóricos y diseño de SCALLs
- 2) Uso de Mawün y descarga de datos de precipitación mensual
- 3) Procesamiento de serie de datos de precipitación
- 4) Cálculo de precipitación de diseño con Gumbel y determinación de volumen de acumulación

De esta manera, con esta guía se busca contribuir al desarrollo de SCALLs eficientes y resilientes, optimizando el uso de recursos hídricos en un contexto cambiante.



Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs)

Los SCALLs corresponden a un conjunto de elementos que permiten capturar la precipitación de agua caída sobre una superficie específica, la cual es derivada a un acumulador mediante canaletas y líneas de conducción. La recolección del agua permite aprovechar el recurso para cultivos dentro de invernaderos, huertas familiares o en la vida diaria de los hogares de productores de zonas áridas, como sucede en el secano costero e interior de la zona central y sur de Chile (INIA, 2016).

La Figura 1 muestra un esquema tipo de un SCALLs, con sus principales elementos y/o componentes.

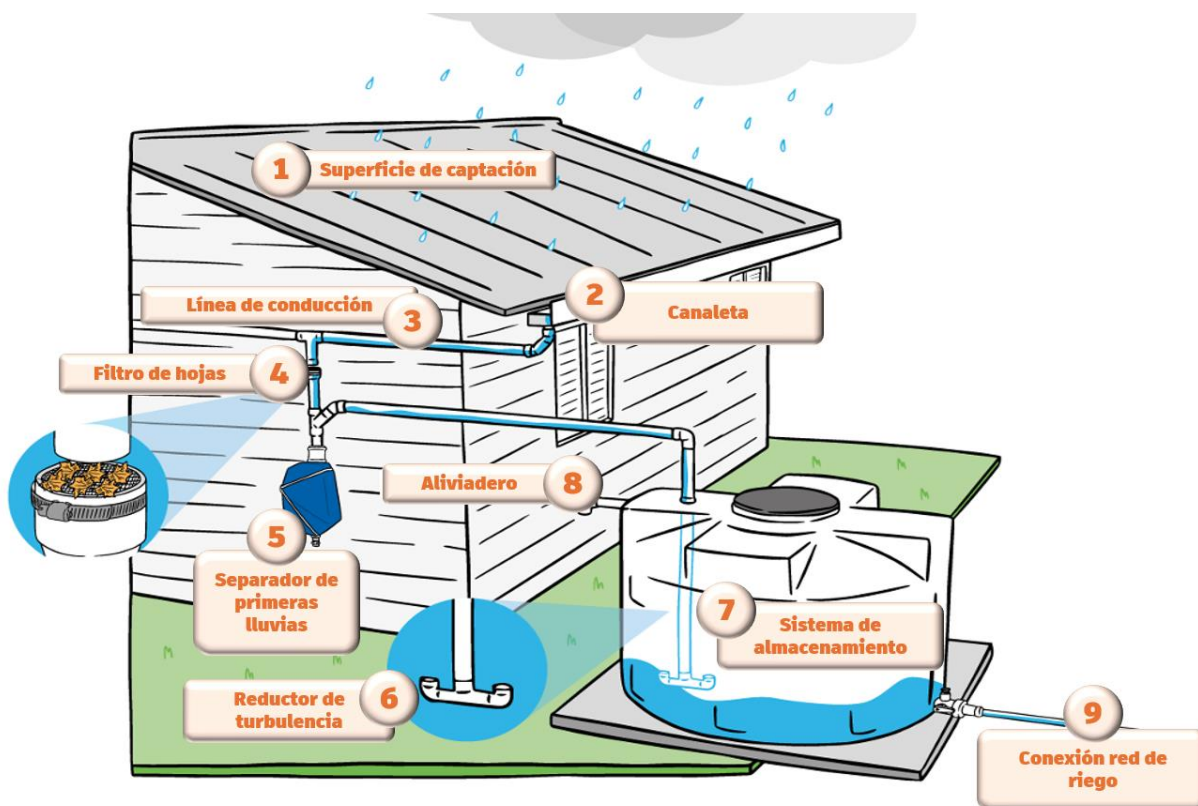


Figura 1: Esquema tipo de Sistema de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs). Fuente: Cántaro Azul.

A continuación, se describen y ejemplifican los principales componentes de los sistemas de captación de agua lluvia.

1. Área o Superficie de captación: Es el área física encargada de captar el agua proveniente de la precipitación. Estos elementos se pueden encontrar como: techo de casas, invernaderos, galpones; laderas de cerro; etc.
2. Canaletas: Encargadas de derivar el recurso hasta el sistema de almacenamiento por la línea de conducción. Los materiales más utilizados son el PVC y la hojalata.



3. Bajada de agua y línea de conducción: Conjunto de tuberías que realizan el transporte del agua pluvial hasta el acumulador. Los tipos de tubos más utilizados son los de agua lluvia, sanitarios y/o hidráulicos.
4. Filtros: Encargados de evitar la entrada de impurezas, residuos orgánicos u otros elementos que puedan obstruir y dañar el sistema en la captación, conducción y almacenamiento (mejoran la calidad del agua acumulada). Dentro de los más importantes se encuentran el filtro de hojas, malla en canaleta, sistema de desvío de primeras aguas, filtro de tapa en estanque, etc.
5. Sistema de almacenamiento: Es el elemento encargado de recibir y almacenar el agua capturada en la superficie de captación. En función a la zona de emplazamiento del proyecto se pueden proyectar distintos tipos de estructuras o tipos de acumuladores, los cuales pueden ser: cisternas flexibles o guateros, estanques verticales, estanques autosoportantes, tranques, estanques australianos de acero galvanizado, etc.

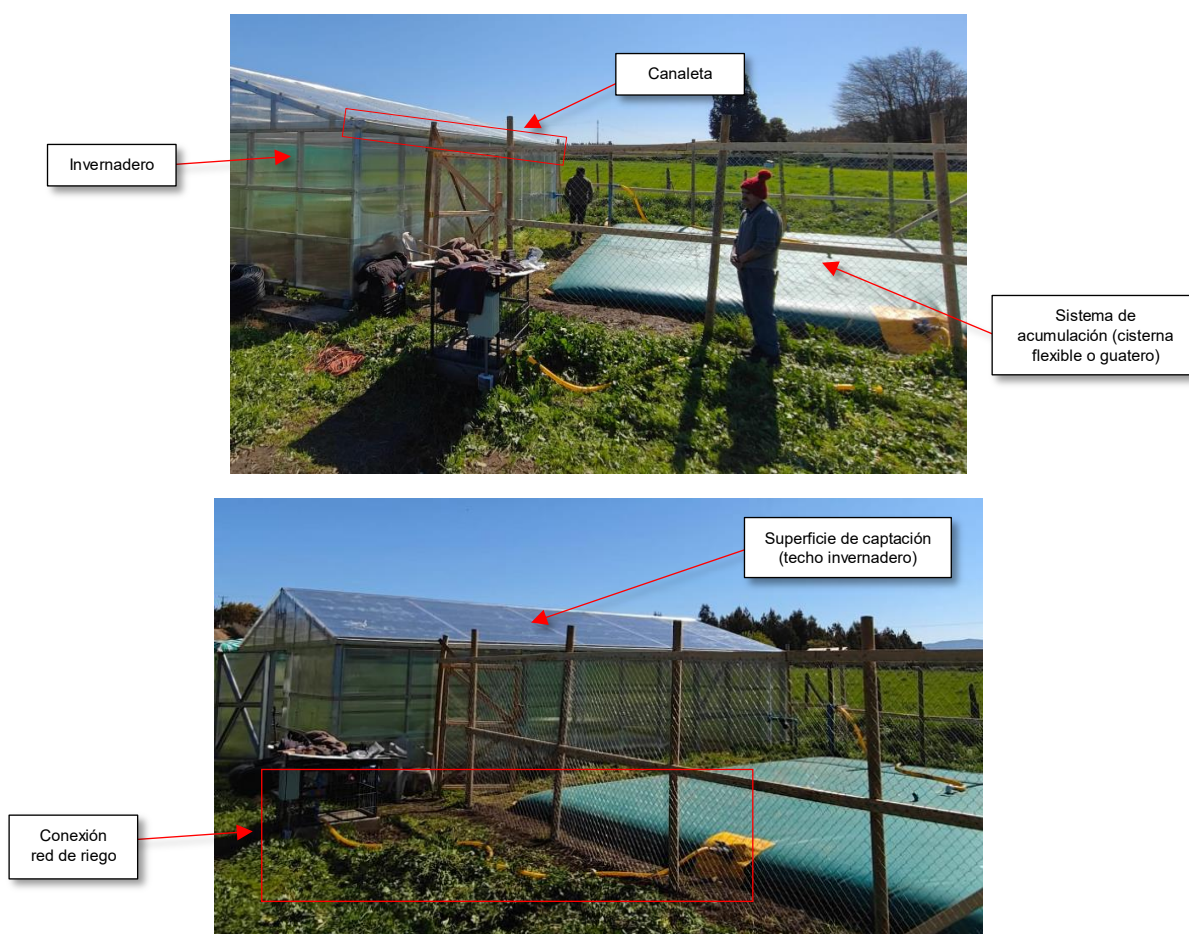


Figura 2. Proyecto 1 de SCALLs bonificado por CNR en localidad de Angol.
Fuente: Elaboración propia.

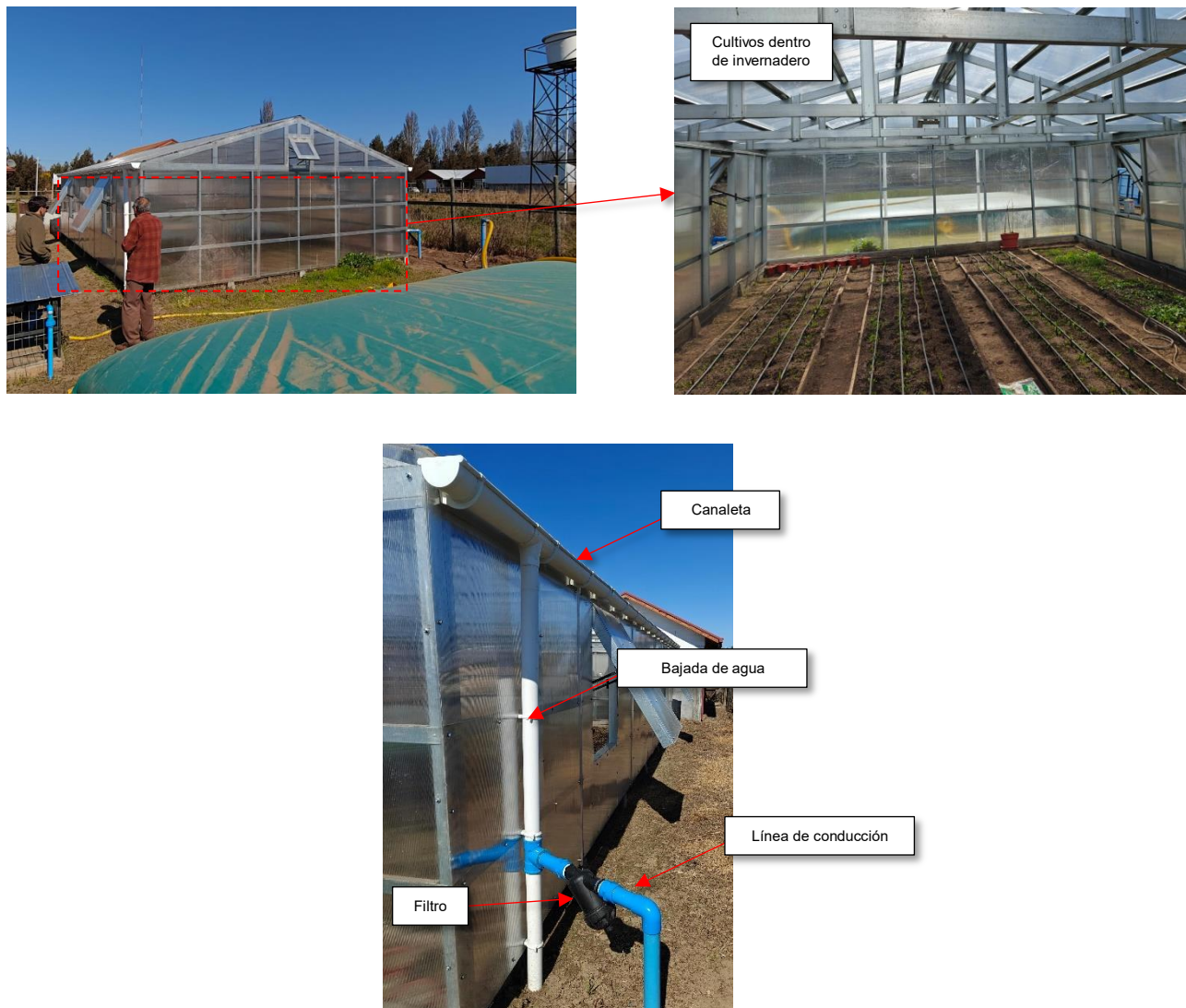


Figura 3. Proyecto 2 de SCALLs bonificado por CNR en localidad de Angol.
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 2 y 3 se aprecian 2 proyectos bonificados por CNR en la localidad de Angol, Región de la Araucanía. En ellos se puede apreciar un SCALLs que presenta canaletas y bajadas de agua de PVC blanco, filtro de malla, conducción en PVC hidráulico y una cisterna flexible o guatero de 50 m³. Además, en ambas figuras se observa la conexión a la red de riego (por goteo), que está compuesto por una impulsión en manguera, equipos de bombeo, cabezales de riego y matrices de PVC hidráulico.



MAWÜN: Explorador de precipitaciones

Mawün (lluvia en mapudungun), es una plataforma online que permite explorar estimaciones espaciales de precipitaciones distribuidas en el territorio continental de Chile. Fue desarrollado por el Observatorio de Recursos Hídricos de la Universidad de la Frontera, con apoyo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). La estimación se obtiene gracias a un producto de precipitación grillado, en el que se pueden visualizar y descargar datos en escala temporal diaria, mensual y anual.



Mawün
Explorador de precipitaciones

La Figura 4 muestra la visualización de Mawün, en ella se pueden observar las principales funciones de la plataforma.

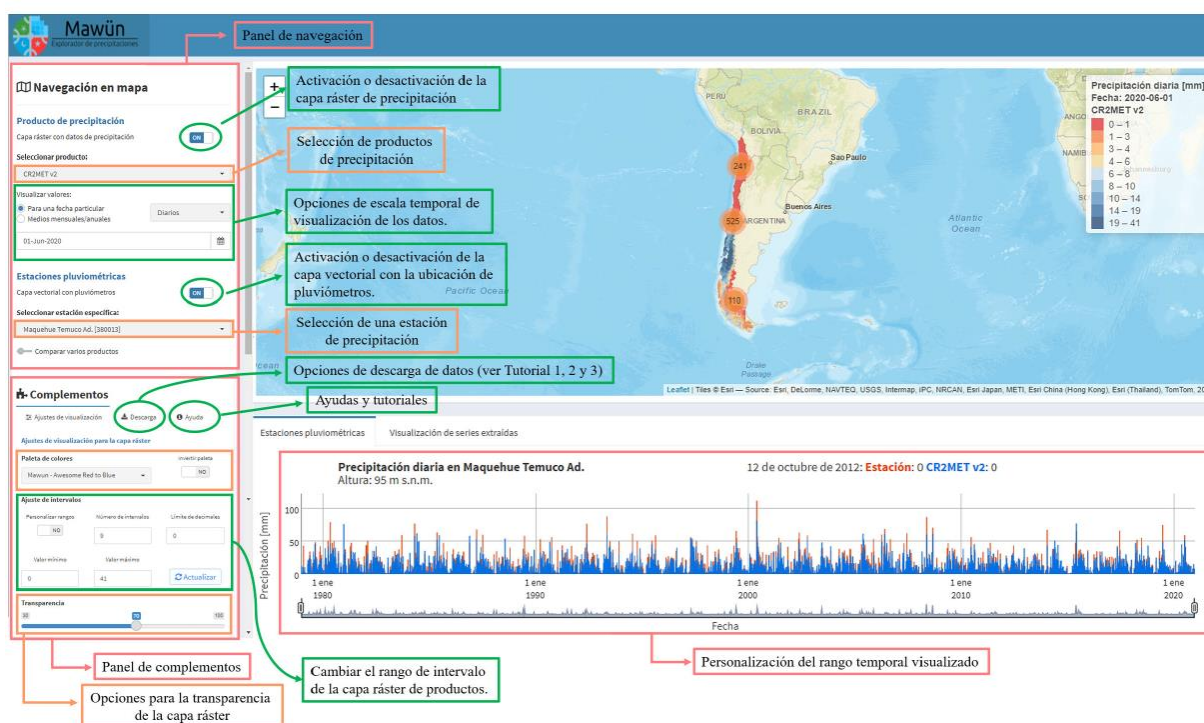


Figura 4. Visualización principal de la plataforma Mawün. Fuente: <https://mawun.cr2.cl/>.



II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DISEÑO DE SCALLS

En el presente capítulo se detallan las bases y procedimientos para obtener la precipitación de diseño, que determina en definitiva el volumen a capturar por año en m³ del sistema de acumulación. Para ello, se trabajará con un modelo estadístico basado en la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones a través de la función de distribución de probabilidad Gumbel, la cual según Pizarro y Novoa (UNESCO, 2015), ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste a precipitaciones, para diversos episodios pluviales. Por lo mismo, se decide en el presente anexo utilizar dicha función en la determinación de los distintos parámetros de diseño de los SCALLS.

De esta manera, para comprender la utilización de la distribución de Gumbel, se comienza por definir los estadígrafos de posición (valores característicos de una muestra de precipitación empleada), periodo de retorno y probabilidad de excedencia.

- Media o promedio (\bar{x}): Valor que representa la suma total de un conjunto de valores, dividida por la cantidad total de números sumados.

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

- Desviación estándar (σ_x): Medida de dispersión o variabilidad que describe como los valores de una muestra se encuentran distribuidos.

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

- Periodo de retorno (T): Intervalo de tiempo promedio en años dentro del cual la magnitud o dimensión de un evento es igualada o excedida una vez. Este valor está asociado al diseño, ya que indica la magnitud del evento hidrológico a considerar para el diseño de una estructura o proyecto (Mendoza y Lagos, 2019).
- Probabilidad de Excedencia (P_{exc}): Probabilidad de que un evento definido con periodo de retorno T sea igualado o excedido.

$$P_{exc}(X \geq x_T) = \frac{1}{T}$$

x_T corresponde al evento asociado al periodo de retorno T



Ahora, la función de distribución de probabilidad acumulada de Gumbel se define mediante la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Donde:

$$u = \bar{x} - 0,5772\alpha \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{\sqrt{6}\sigma}{\pi}$$

u : moda de la muestra

α : parámetro de la función

Para trabajar con la función de distribución de Gumbel, se aplicará el método del factor de frecuencia planteado por Ven Te Chow para determinar eventos asociados a cierta probabilidad de excedencia (McPhee, 2013). El método define una magnitud x_T , que se expresa de la siguiente forma:

$$x_T = \mu + \Delta x_T$$

Lo anterior se entiende como si el valor asociado al periodo de retorno T se determinara como la media μ de una muestra más una desviación de la magnitud a determinar, dónde esta variación se puede escribir como la multiplicación entre un factor de frecuencia K_T y la desviación estándar σ ; tal como se detalla a continuación.

$$x_T = \mu + K_T \sigma$$

La Figura 5 corresponde a la representación gráfica de lo indicado en el párrafo anterior.

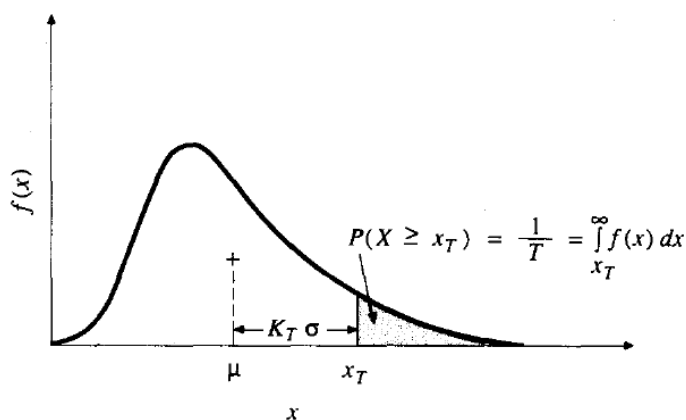


Figura 5. Magnitud de un evento (x_T) expresado como una desviación ($K_T \sigma$) de la media (μ).
Fuente: Chow (1994).



Considerando que se cuenta con una muestra de datos, la expresión anterior puede cambiar a:

$$x_T = \bar{x} + K_T s$$

De acuerdo con Chow, el valor de K_T para la distribución de Gumbel se escribe como:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right\}$$

o, en el caso de querer determinar T en términos de K_T :

$$T = \frac{1}{1 - e^{-e^{\left(0,5772 + \frac{\pi K_T}{\sqrt{6}} \right)}}}$$

Cuando el tamaño de la muestra es pequeño, se debe realizar una corrección por el número de años mediante la utilización de la *variable reducida*:

$$y = -\ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right)$$

El valor de x_T se define ahora como:

$$x_T = \bar{x} + (y - y_n) \frac{\sigma_x}{\sigma_n}$$

Donde y_n y σ_n se definen como los estadígrafos dependientes del número total de datos de la muestra n (parámetros corregidos de Gumbel). Los parámetros se encuentran tabulados y se detallan en la Figura 6.



n	y _n	σ _n		n	y _n	σ _n
10	0.4952	0.9496		60	0.5521	1.1747
15	0.5128	1.0206		65	0.5535	1.1803
20	0.5236	1.0628		70	0.5548	1.1854
25	0.5309	1.0914		75	0.5559	1.1898
30	0.5362	1.1124		80	0.5569	1.1938
35	0.5403	1.1285		85	0.5578	1.1974
40	0.5436	1.1413		90	0.5586	1.2007
45	0.5463	1.1518		95	0.5593	1.2037
50	0.5485	1.1607		100	0.5600	1.2065
55	0.5504	1.1682				

Figura 6. Valores tabulados que se utilizan en la interpolación de los parámetros corregidos de Gumbel. Fuente: McPhee (2013).

El valor de la variable x_T se puede entender como una precipitación de diseño P_d , la cuál permitirá en definitiva dar cumplimiento al diseño completo del sistema de captación de aguas lluvias. Para ello, se emplea la siguiente expresión (UNESCO, 2015):

$$A_c = \frac{V}{P_d C}$$

Donde:

A_c : Área o superficie de captación [m²]

V : Volumen anual del sistema de almacenamiento [m³]

P_d : Precipitación anual de diseño, calculada con una P_{exc} del 90% [m]

C : Coeficiente de escorrentía, que tiene un valor de 0,85



III. USO DE MAWÜN Y DESCARGA DE DATOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL

En el presente capítulo, se procede a detallar el paso a paso para la obtención del set de datos de precipitación mensual, el cual se descarga de la plataforma en línea Mawün (<https://mawun.cr2.cl/>). Es importante recalcar que en este anexo sólo se indica la manera de efectuar la descarga de datos para un punto de una zona de estudio particular; por lo que, otras funciones de la plataforma, como son la visualización de distribución espacial, comparación de series temporales y descarga de capas diarias de precipitación para un evento específico, se pueden revisar en el Tutorial de Mawün disponible en la plataforma del CR2.

Paso 1: Ubicación en pestaña **Descarga**

Ingresa al sitio Mawün, y dentro de este, ubícate en el panel lateral izquierdo de la plataforma; dirígete a los *Complementos* y selecciona en primer lugar la pestaña de *Descarga*. Luego, selecciona la subpestaña de *Punto* (Figura 7). De esta manera, se logra acceder a las opciones de Mawün para obtener la precipitación en un punto definido por el usuario.

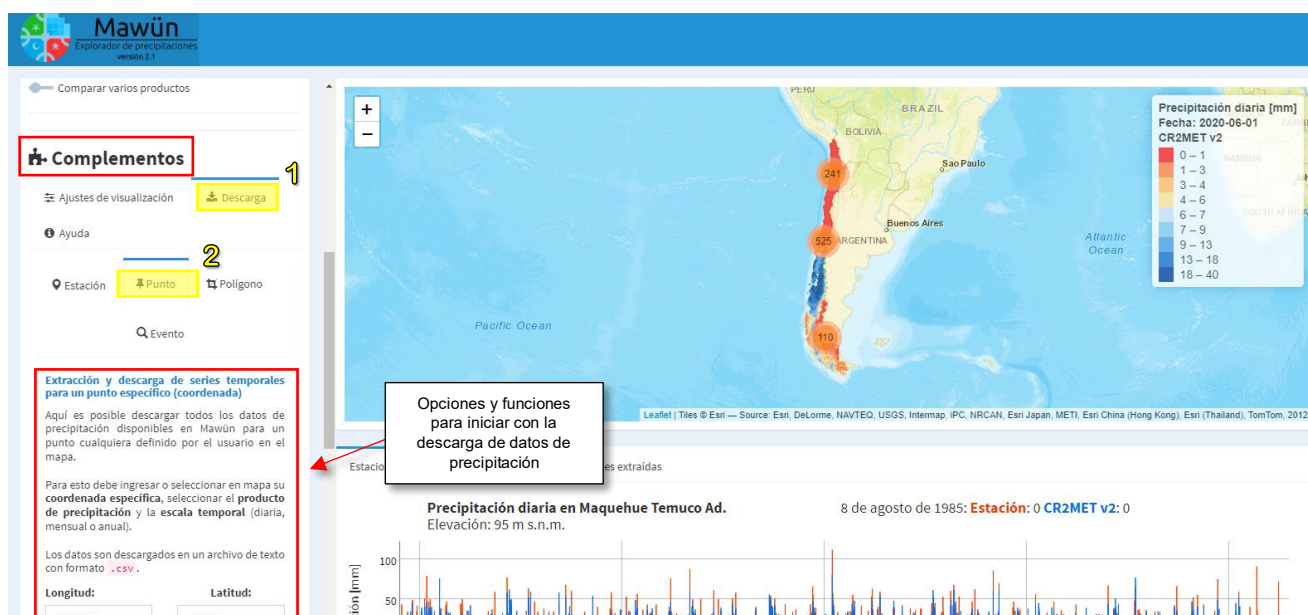


Figura 7. Ubicación en pestaña de Descarga y subpestaña Punto del sitio Mawün. Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Selección de punto o ingreso de coordenadas del proyecto SCALLS

Para poder situarse en la zona de emplazamiento o punto específico del proyecto SCALLS, Mawün presenta 2 opciones:

- Selección de punto: Es posible seleccionar un punto específico del mapa de la plataforma, para ello, se debe en primer lugar presionar la opción *Seleccionar punto en el mapa*, para luego pinchar la ubicación específica donde se emplazará el proyecto. Con ello, se genera un pin rojo sobre el punto seleccionado, al que se le asocian coordenadas (ver Figura 8). En caso de cometer error o querer modificar



ubicación, debe presionar **Borrar punto** y repetir el procedimiento inicial para ir a otro punto.

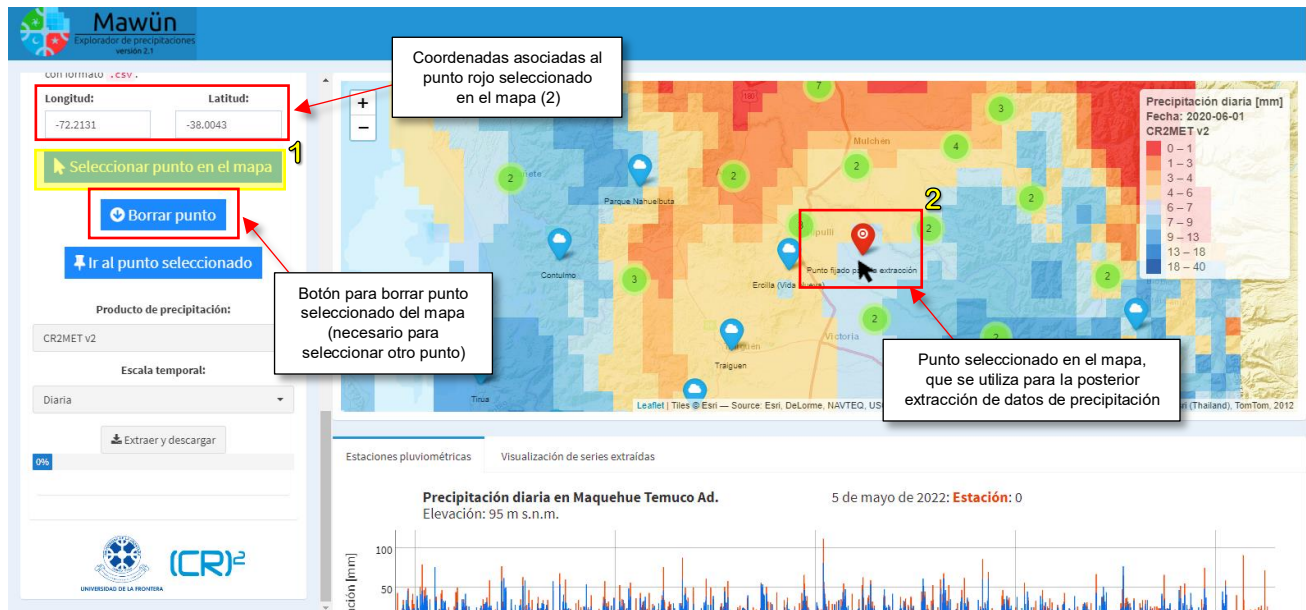


Figura 8. Selección de punto con cursor en Mawün. Fuente: Elaboración propia.

- Ingreso de coordenadas: Primero, se ingresan coordenadas (en unidades de longitud y latitud) y luego se presiona el botón del sistema *Ir al punto seleccionado* (ver Figura 9). En este caso, no se agrega pin en el mapa, sólo se mueve el mapa centrado en el punto indicado.

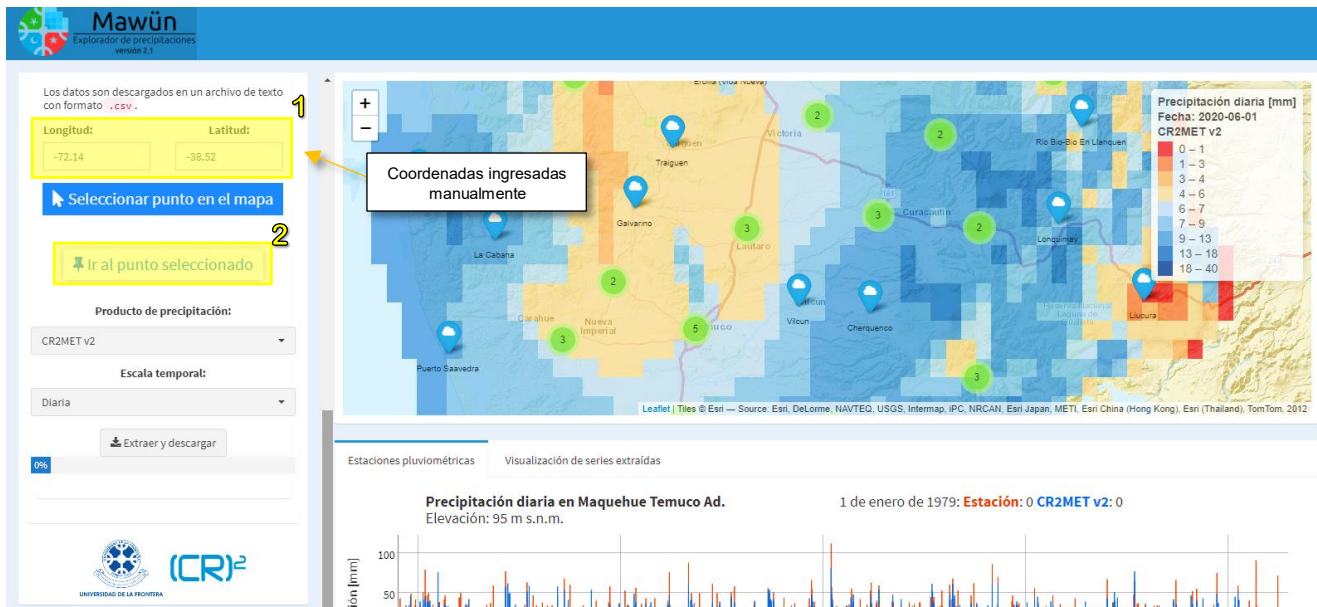


Figura 9. Ingreso de coordenadas; en el ejemplo se introducen coordenadas longitud -72.14 y latitud -38.52. Fuente: Elaboración propia.



Paso 3: Selección de producto de precipitación y escala temporal de descarga

Mawün presenta una lista desplegable de diversos productos de precipitación y una selección de distintas escalas temporales (diaria, mensual y anual), ubicado posterior a las opciones de selección de punto. Para el caso del presente anexo, se considerará el producto grillado de **CR2MET v2** y se seleccionará la escala temporal mensual de precipitación, tal como se detalla en la Figura 10.

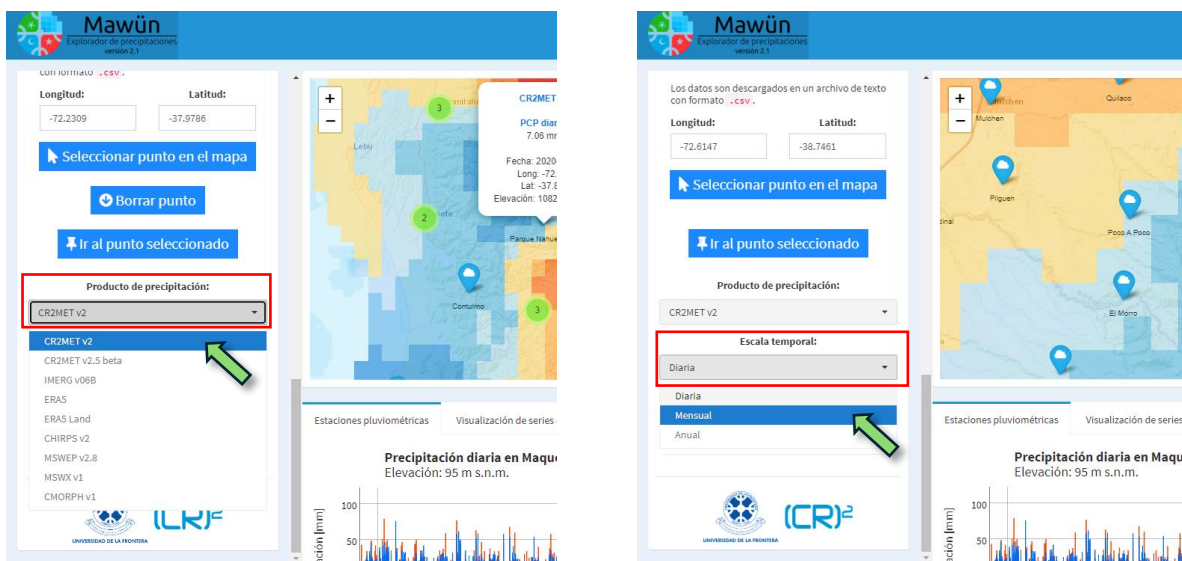


Figura 10. Selección de producto de precipitación y escala temporal. Fuente: Elaboración propia.

Paso 4: Descarga de datos de precipitación mensual

Al definir claramente las preferencias de la plataforma (detalladas en los pasos anteriores), se debe seguir con la extracción y descarga de la serie de precipitaciones mensuales para el punto específico seleccionado. Para ello, se debe presionar el botón de *Extraer y descargar* de Mawün (Figura 12).

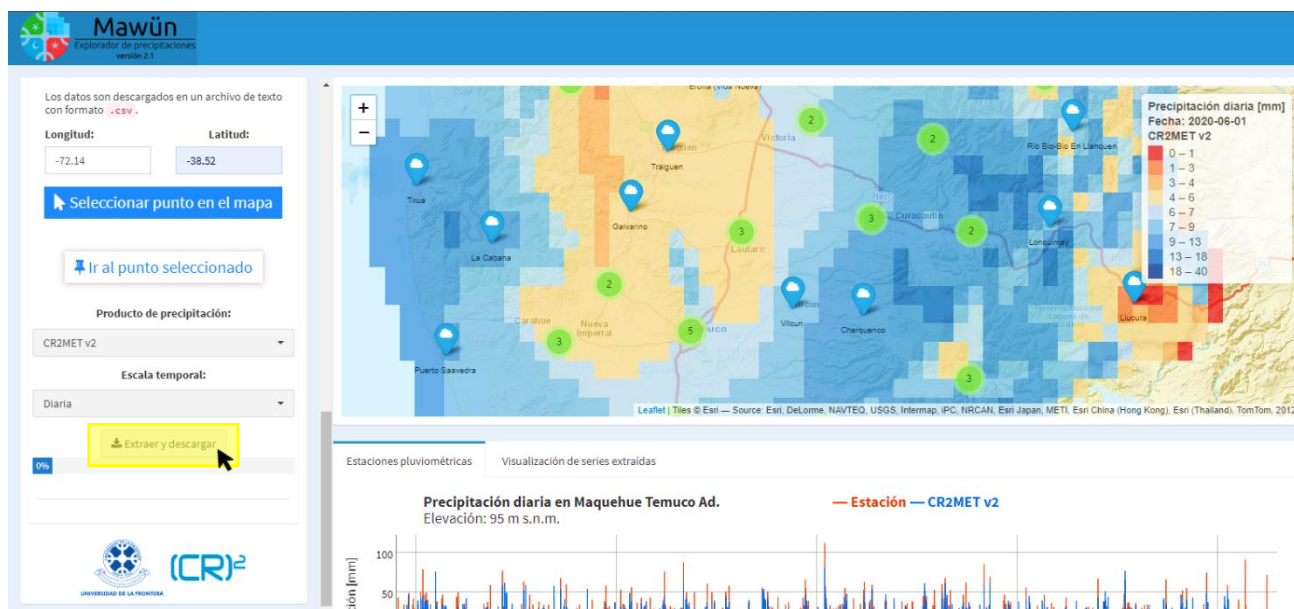


Figura 12. Visualización final previa a la descarga de datos (el ejemplo se tomó con el ingreso manual de coordenadas). Fuente: Elaboración propia.

La descarga se efectúa en formato de archivo csv (archivo Excel como se aprecia en la Figura 13), y su modo de presentación es el que se detalla en la Figura 14, dónde se aprecia una columna de fecha (formato aaaa-mm) anexada a una precipitación mensual en [mm].

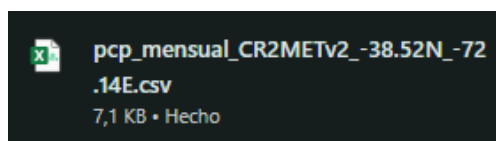


Figura 13. Ejemplo de descarga de serie de precipitación mensual, para punto específico con coordenadas longitud -72.14 y latitud -38.52.

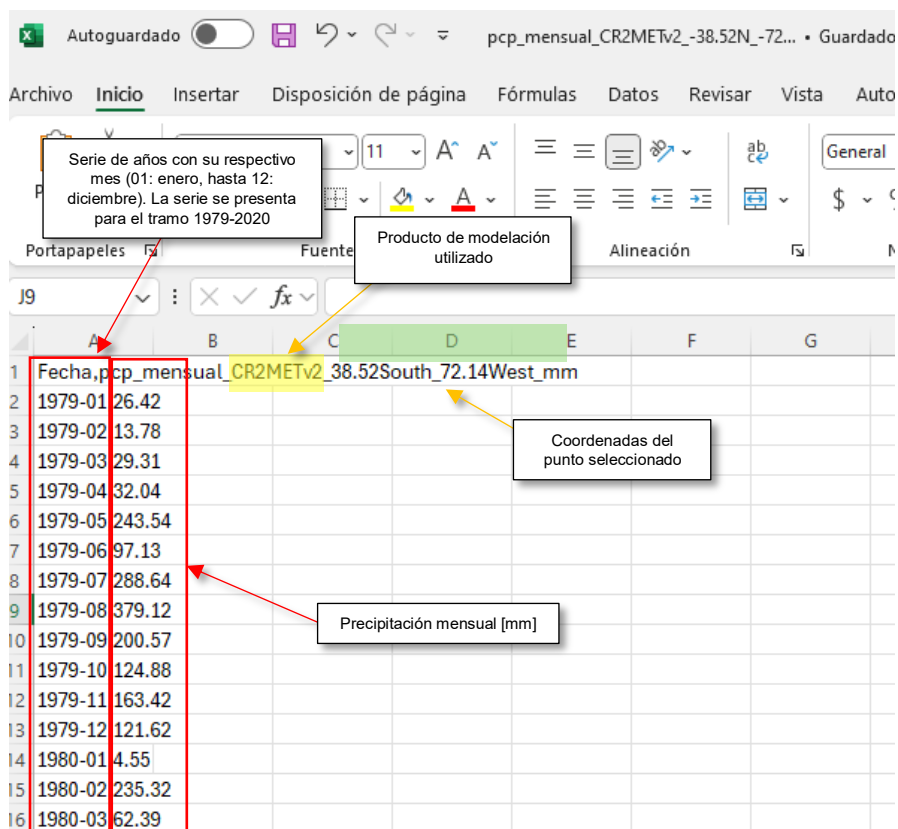


Figura 14. Excel ejecutado proveniente de la descarga en Mawün, dónde se observan los datos agrupados en una columna donde se detalla la fecha con año y mes, asociada al valor de precipitación mensual del punto seleccionado en la plataforma, dado cierto producto de modelación hidrometeorológico. Fuente: Elaboración propia.



IV. PROCESAMIENTO DE SERIES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN

En el presente capítulo del anexo, se indicará la forma de obtener la precipitación de diseño, la cual se trabajará con las expresiones de la distribución de probabilidad de Gumbel. La precipitación, junto al volumen de acumulación anual y el coeficiente de escorrentía (dependiente del material del acumulador), permiten obtener la superficie de captación del SCALLs, según la expresión detallada en el Capítulo II.

Con lo anterior, se puede entender que el volumen disponible para el sistema de riego depende directamente del área de captación y de la precipitación de diseño:

$$V = A_c P_d C$$

Así, a continuación, se detallará al igual que en el capítulo anterior del anexo, el paso a paso del procesamiento de datos de precipitación mensual descargados de la plataforma Mawün, trabajando con el archivo Excel en formato csv.

Paso 1: Ejecutar archivo Excel csv de precipitación mensual de Mawün

Posterior a la descarga del archivo de precipitaciones mensuales obtenidos de la plataforma Mawün, se debe ejecutar el archivo Excel (formato csv) y seleccionar la primera columna (columna A), tal como se indica en la Figura 15.

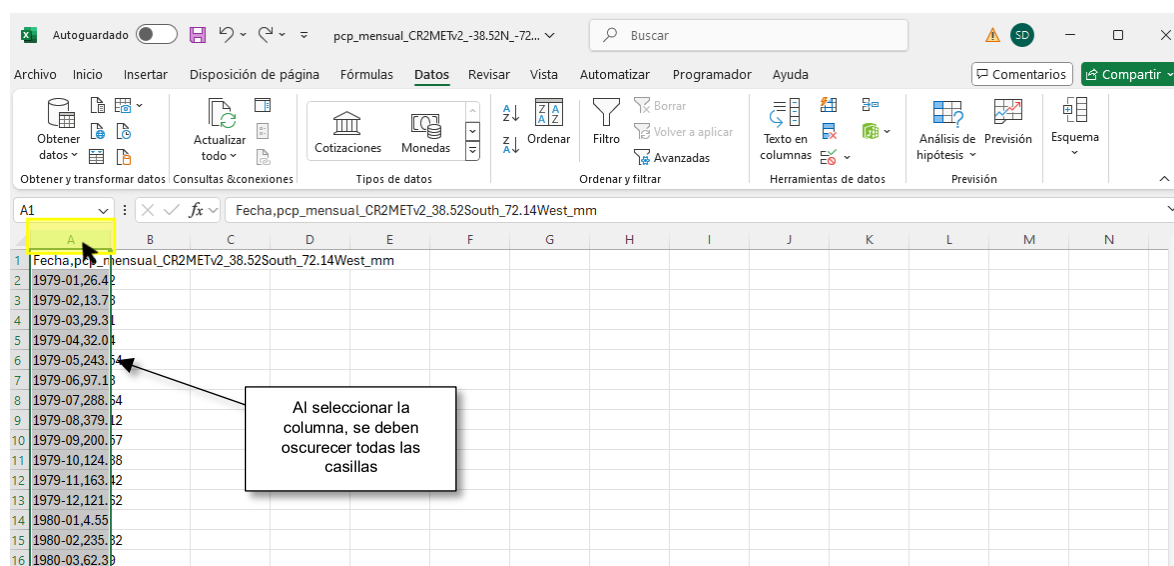


Figura 15. Selección de columna con datos agrupados de precipitación mensual. Fuente: Elaboración propia.



Paso 2: Procesar datos con herramienta *Texto en columnas*

Con la columna de información seleccionada, situarse en la pestaña *Datos* del archivo Excel y seleccionar la opción de *Texto en columnas*, dónde se desplegará una nueva ventana, tal como se aprecia en la Figura 16.

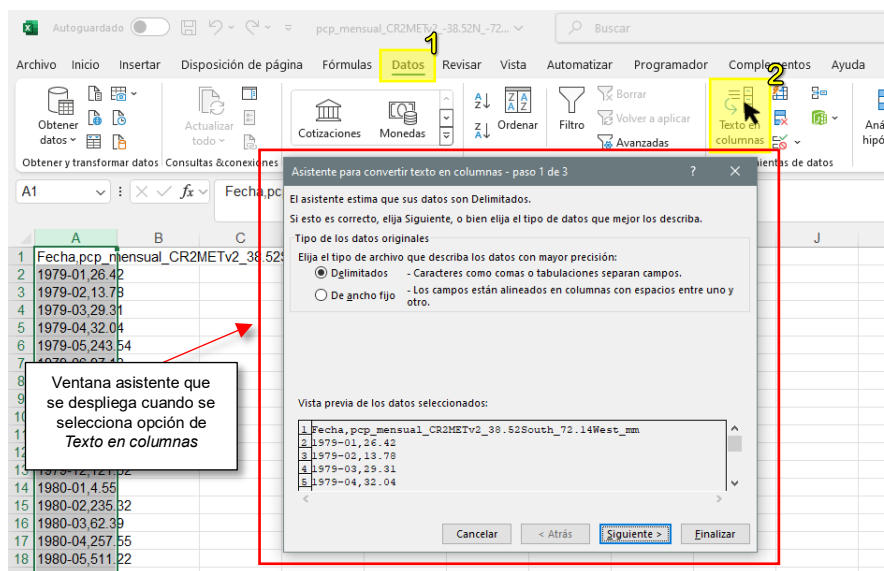


Figura 16. Visualización de ventana emergente proveniente de la conversión del texto en columnas. Fuente: Elaboración propia.

La opción seleccionada permite dividir el contenido de la columna de texto en varias columnas. Debido a que los datos de fecha se encuentran en formato de año y mes (e.g. 1995-10 o precipitación en octubre de 1995), se dividirá el texto en dos columnas; una de **fecha** y otra de **precipitación**. Para ello, en la ventana desplegada (Figura 16) se debe presionar *Siguiente* y luego en la opción de separadores se debe marcar la opción de *Coma* para finalmente volver a presionar *Siguiente* (ver Figura 17).

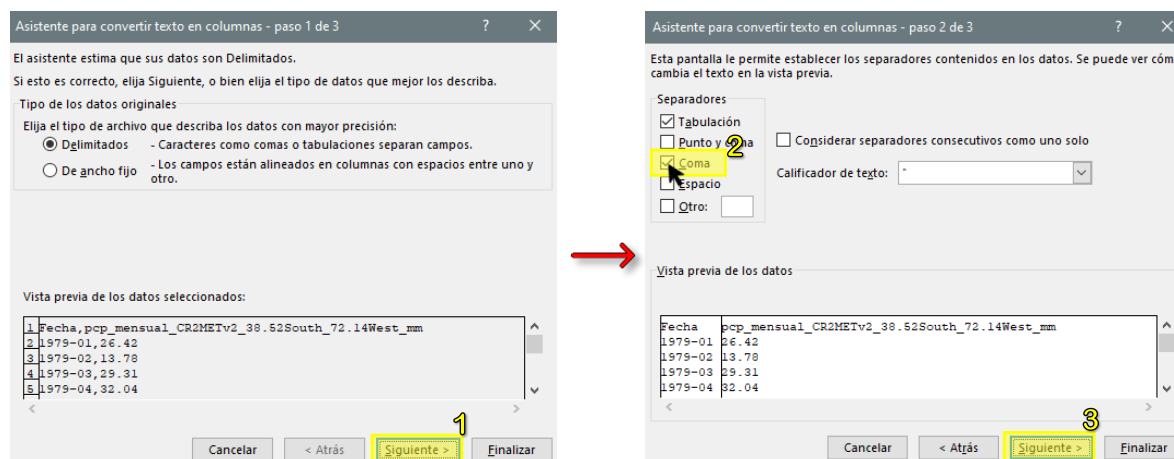


Figura 17. Ventanas del desarrollo del tratamiento de texto en columnas. Fuente: Elaboración propia.



Paso 3: Procesar datos con herramienta *Texto en columnas*

Ahora, se puede apreciar que las columnas se encuentran separadas en “Fecha” y “pcp_mensual_CR2METv2...”. Luego, se debe modificar el formato de la columna Fecha (el archivo csv posee por defecto formato General para los datos). Lo anterior se realiza en primer lugar seleccionando la columna, para luego presionar *Fecha* en el checkbox, y por último, se abre la lista desplegable para seleccionar la opción *AMD* (formato año, mes y día). La columna de precipitación no se modifica y se deja en formato General. Para terminar el proceso, se presiona el botón de *Finalizar* y se obtienen los datos de precipitación mensual separados en fecha y magnitud de precipitación en unidad de [mm]. Las indicaciones anteriores se pueden ver en la Figura 18.

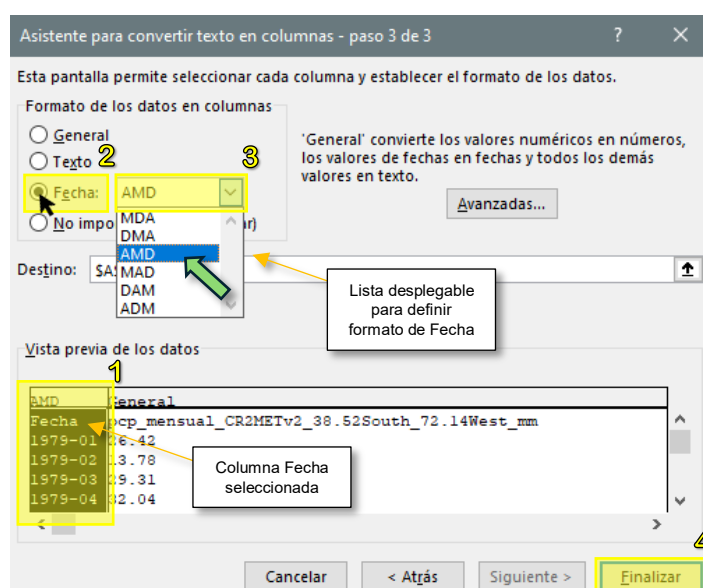
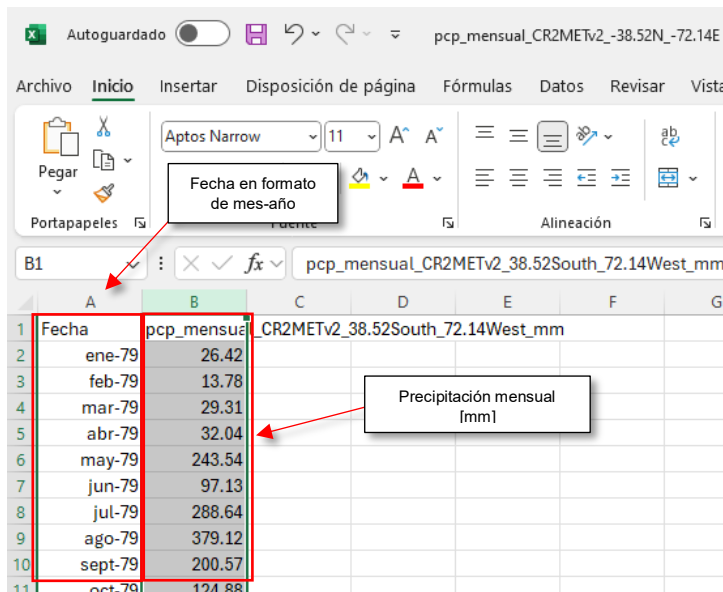


Figura 18. Ventana final del tratamiento de texto en columnas. Fuente: Elaboración propia.



Paso 4: Generación de tabla dinámica y cálculo de estadígrafos de la muestra

Posterior al paso 3, se debe generar la división de las columnas fecha y precipitación, tal como se aprecia en la Figura 19.



	A	B	C	D	E	F	G
1	Fecha	pcp_mensual_CR2METv2_38.52South_72.14West_mm					
2	ene-79	26.42					
3	feb-79	13.78					
4	mar-79	29.31					
5	abr-79	32.04					
6	may-79	243.54					
7	jun-79	97.13					
8	jul-79	288.64					
9	ago-79	379.12					
10	sept-79	200.57					
11	oct-79	124.88					

Figura 19. Columnas generadas posterior al tratamiento del texto en columnas. Fuente: Elaboración propia.

Ahora, se deben trabajar las columnas para obtener el promedio y la desviación estándar de la serie de datos de precipitación mensual, los cuales se utilizarán en la distribución de Gumbel para obtener los valores mensuales de precipitación, asociados a la probabilidad de excedencia del caso estudiado.

De esta manera, para determinar los estadígrafos se procede a generar una **tabla dinámica en Excel**, que permitirá de una manera rápida e interactiva procesar la gran cantidad de datos numéricos obtenidos del punto seleccionado en Mawün. Para ello, se debe en primer lugar seleccionar las columnas A y B (fecha y precipitación), para después dirigirse a la pestaña *Insertar* y presionar la opción *Tabla dinámica*. Luego, se desplegará una ventana en la que se verá definido el rango de la tabla (ver Figura 20). Para finalizar, asegurarse que se encuentre seleccionada la opción de *Nueva hoja de cálculo* (lugar donde se ubica la tabla dinámica) y presione *Aceptar* para abrir el entorno de la tabla dinámica.

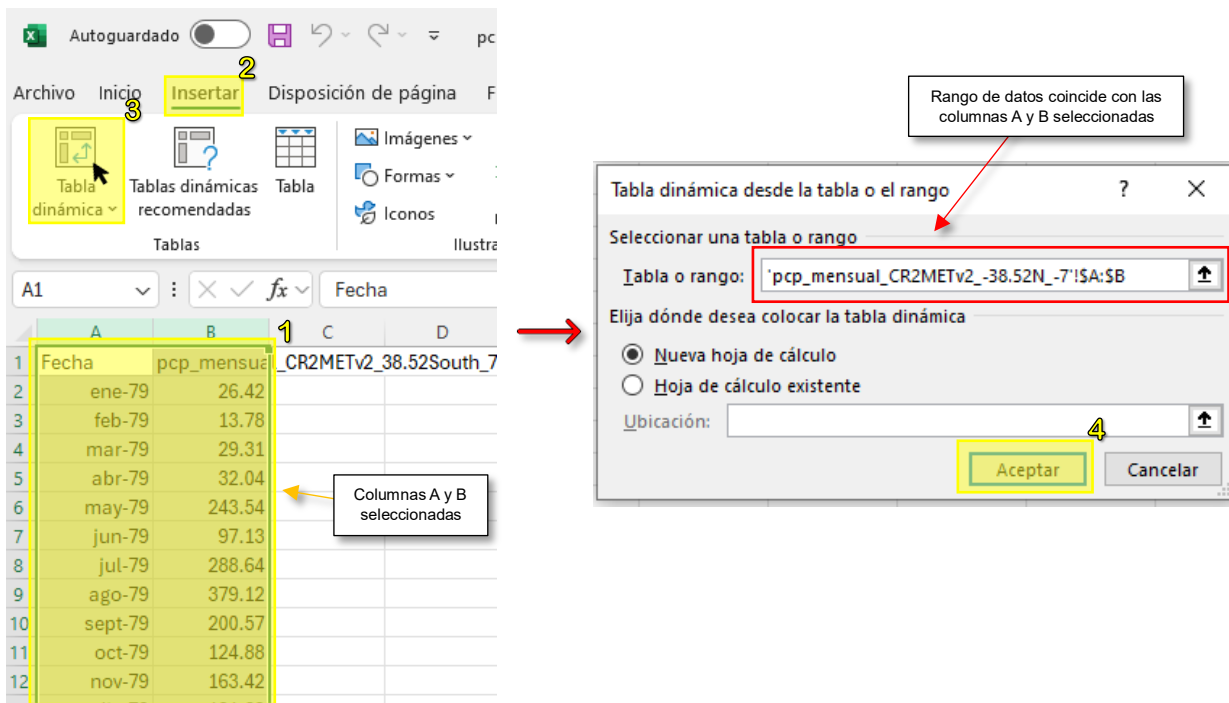


Figura 20. Ventana configuración inicial de tabla dinámica. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 21, muestra el entorno de trabajo de la tabla dinámica de los rangos a estudiar.

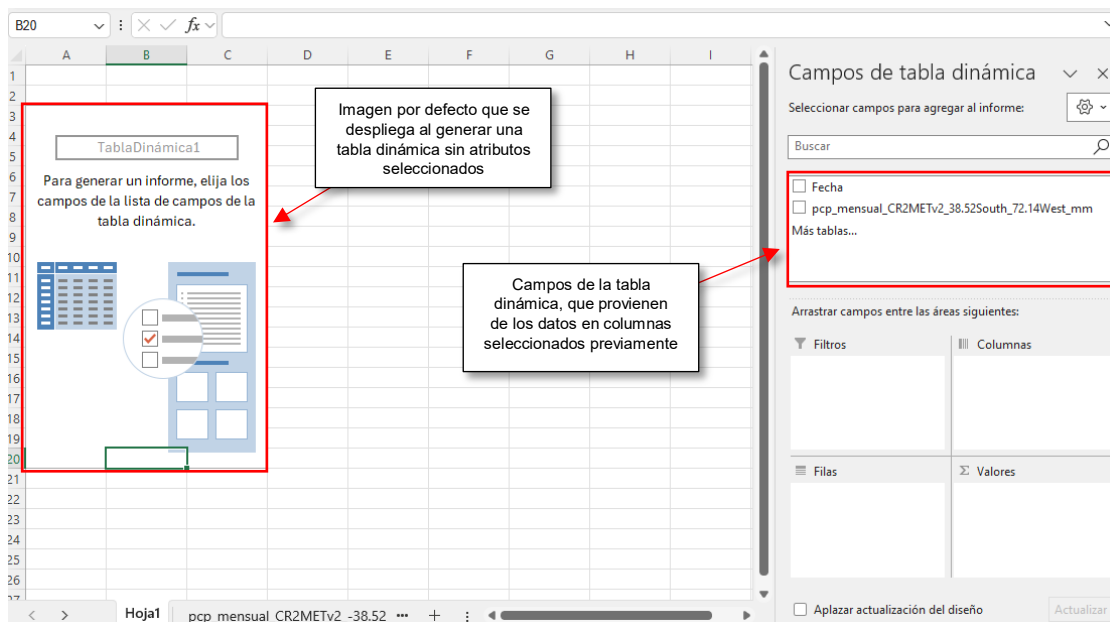


Figura 21. Entorno de trabajo que se ejecuta al acceder a la configuración de tabla dinámica. Fuente: Elaboración propia.



Luego, debe dirigirse a la ventana lateral derecha y seleccionar los campos de **pcp_mensual_CR2METv2(...)** y de **Meses (Fecha)**. También, debe presionar en el área de **Σ Valores**, la lista desplegable por defecto que indica **Suma de pcp_mensual_ (...)**. Al desplegarse la lista, presionar la sub-opción *Configuración de campo de valor*, y esperar que se abra una ventana para efectuar configuraciones.

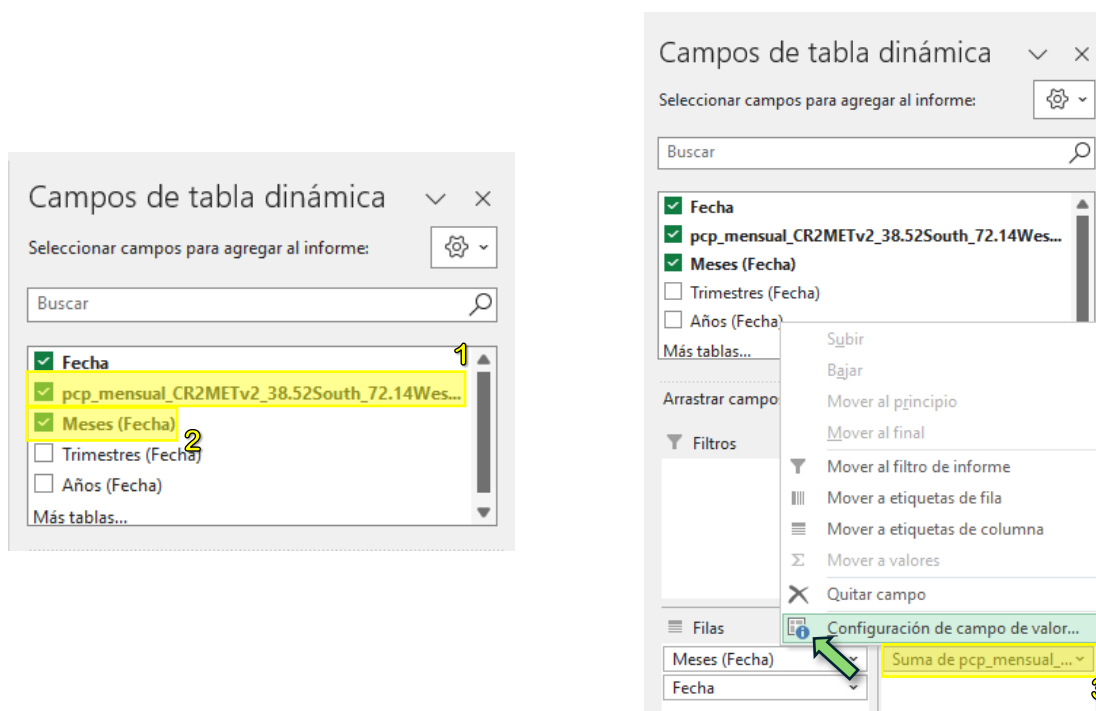


Figura 22. Elección de campos de tabla dinámica y configuración de campo de valor.
Fuente: Elaboración propia.

La ventana de configuración de campo de valor permite elegir el tipo de cálculo que se quiere usar para resumir los valores de la serie de datos. Como la distribución de Gumbel requiere del promedio y la desviación estándar, se determina primero el *promedio*, seleccionando en la lista de cálculo la opción con el mismo nombre (ver Figura 23).

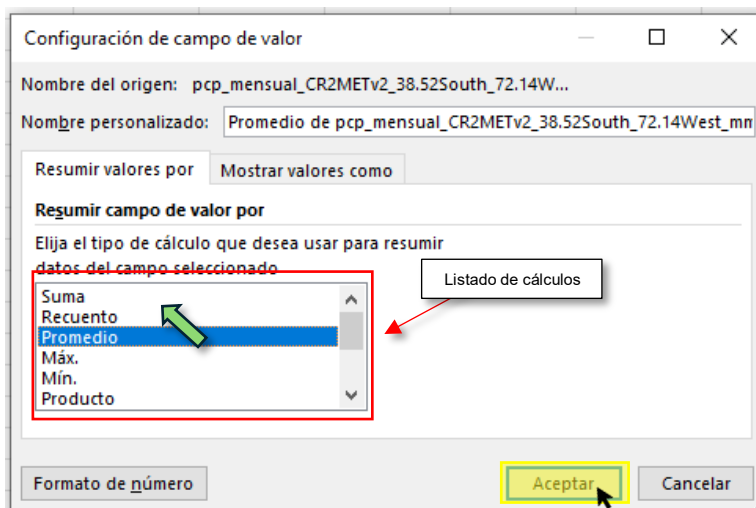


Figura 23. Configuración de campo de valor con cálculo de promedio. Fuente: Elaboración propia.

Al presionar *Aceptar*, se cargan los valores promedio de precipitación para todos los meses de los años analizados (desde el año 1979 hasta el año 2020). Estos valores, se seleccionan y se pegan en una nueva hoja del Excel, para que sean ocupados en el cálculo final utilizando la distribución de Gumbel. Lo anterior se observa en la Figura 24 y 25.

Etiquetas de fila Promedio de pcp_mensual_CR2METv2_38.52South_72.14West_mm

<01-01-1979	
ene	45.15761905
feb	47.67047619
mar	65.61880952
abr	125.735
may	240.5945238
jun	292.9319048
jul	241.5054762
ago	214.8628571
sept	133.847381
oct	119.2442857
nov	81.93357143
dic	67.93833333
Total general	139.7533532

Selección de datos promedios mensuales de precipitación de la serie analizada

Opción de hoja nueva

Hoja1 pcp_mensual_CR2METv2_-38.52N_-7

Figura 24. Promedios obtenidos en base al cálculo efectuado por la tabla dinámica. Fuente: Elaboración propia.

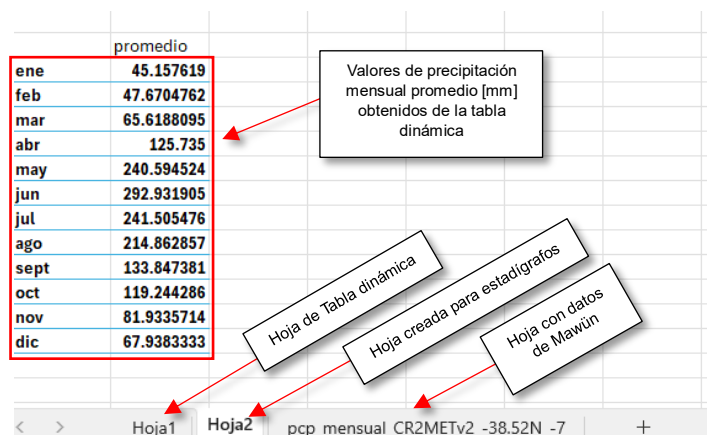


Figura 25. Promedios pegados provenientes de la tabla dinámica. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior se repite de la misma manera, pero ahora seleccionando como cálculo la desviación estándar por mes, para después pegar dichos valores en la hoja creada de datos calculados por la tabla dinámica, tal como se detalla en la Figura 26.

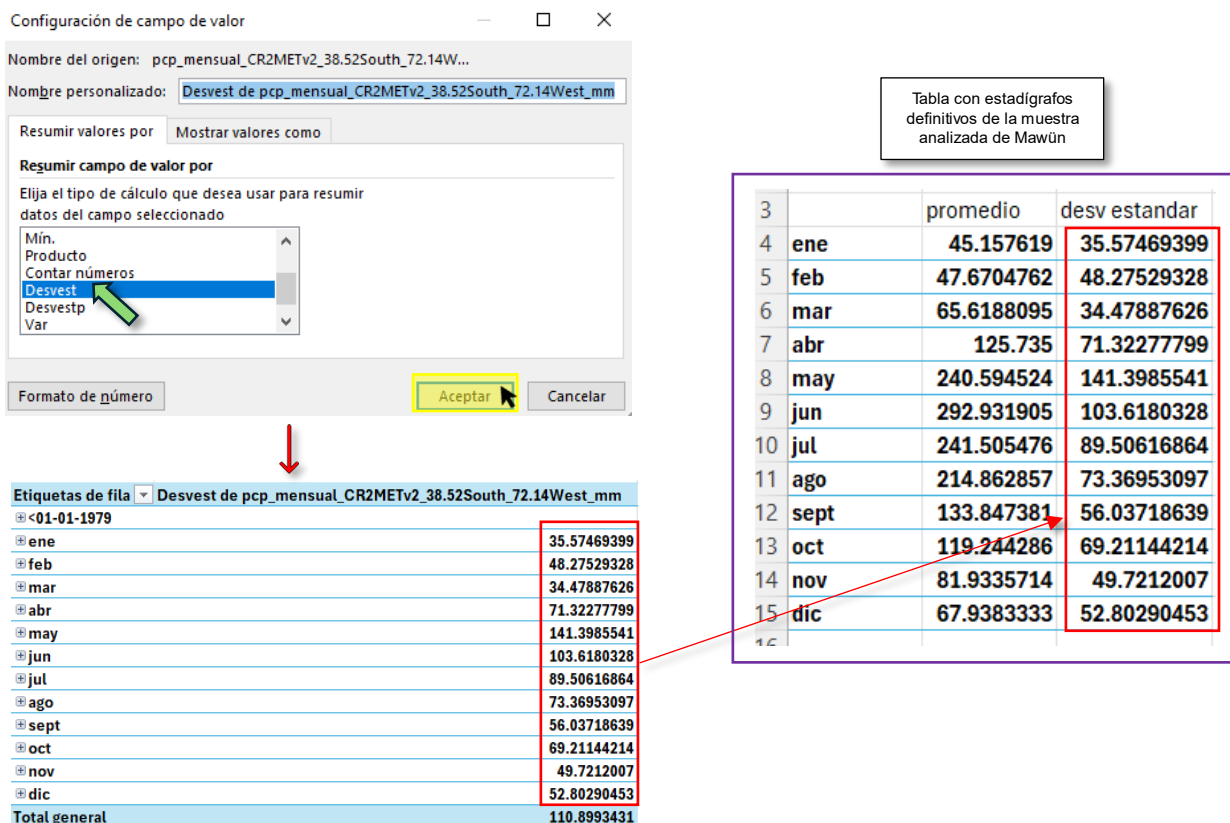


Figura 26. Configuración, cálculo y datos provenientes de la tabla dinámica para desviación estándar. Fuente: Elaboración propia.



Paso 5: Guardar archivo en formato Libro de Excel

Para finalizar todo lo anterior, debido a que el documento tiene formato delimitado por comas (csv), se debe guardar el archivo Excel en formato libro, para poder trabajar con él posteriormente. Para ello, debe dirigirse a la pestaña de *Archivo* y seleccionar la opción *Exportar* (ver Figura 27).

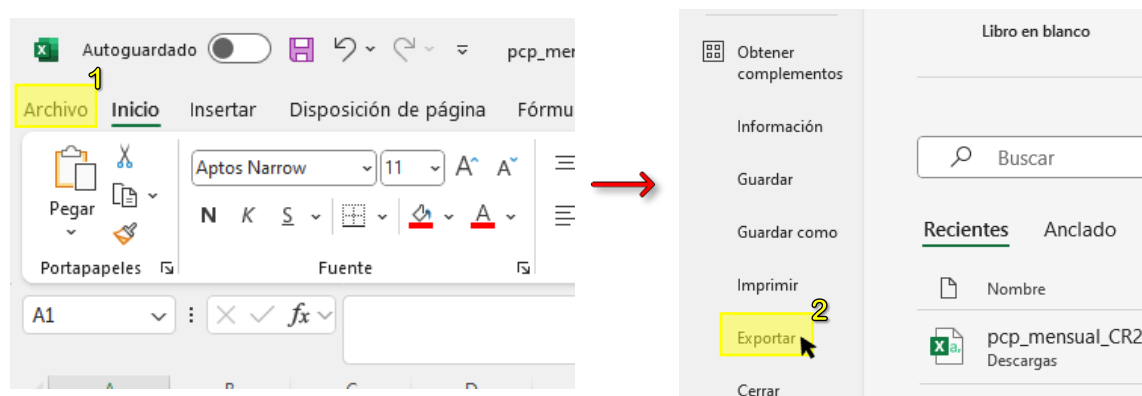


Figura 27. Opciones para efectuar cambio del tipo de archivo a exportar. Fuente: Elaboración propia

En la opción *Exportar*, se debe presionar *Cambiar el tipo de archivo*, dónde se despliega un cuadro con todas las opciones de cambio. En este cuadro, se verá seleccionada la opción de *CSV (delimitado por comas)*, sin embargo, se debe modificar presionando el tipo de archivo *Libro*, para finalmente guardar el archivo en el directorio local que se estime, tal como se detalla en la Figura 28.

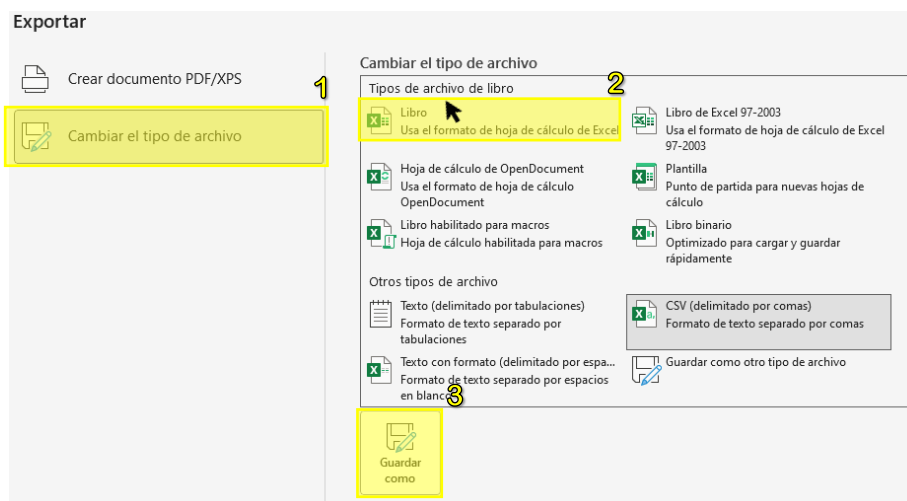


Figura 28. Opciones para exportar y cambiar tipo de archivo Excel. Fuente: Elaboración propia.



V. CÁLCULOS DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO CON GUMBEL Y DETERMINACIÓN DE VOLUMEN DE ACUMULACIÓN

Recordamos la distribución de Gumbel, la cual se reescribe ahora en función de la variable de precipitación como:

$$P_d = \bar{P} + (y_T - y_n) \frac{\sigma_P}{\sigma_n}$$

Donde:

P_d : Precipitación de diseño asociada a un periodo de retorno T [mm]

\bar{P} : Promedio de precipitaciones de la muestra [mm]

y_T : Variable reducida dependiente del periodo de retorno T [-]

y_n, σ_n : Parámetros corregidos de Gumbel

σ_P : Desviación estándar de la muestra de precipitaciones [mm]

Así, para utilizar la distribución de Gumbel es necesario conocer y determinar lo siguiente:

- Promedio y desviación estándar de la muestra
- Variable reducida
- Periodo de retorno
- Parámetros corregidos de Gumbel

De lo anterior, se conoce tanto el promedio como la desviación estándar de la muestra, por lo que sólo basta conocer la variable reducida (que depende del periodo de retorno) y los parámetros de Gumbel. Para el primer caso, entendiendo que el análisis y **diseño se trabaja con una probabilidad de excedencia es del 85%**; según la expresión detallada en el Capítulo 2, se tendrá que:

$$P_{90\%} = 85\% = \frac{1}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{0,85} = 1,18 \text{ años}$$

Ahora, reemplazando el valor de T en la expresión de la variable reducida se tiene:

$$y_T = -\ln\left(\ln\left(\frac{1,18}{1,18 - 1}\right)\right) = -0,631$$

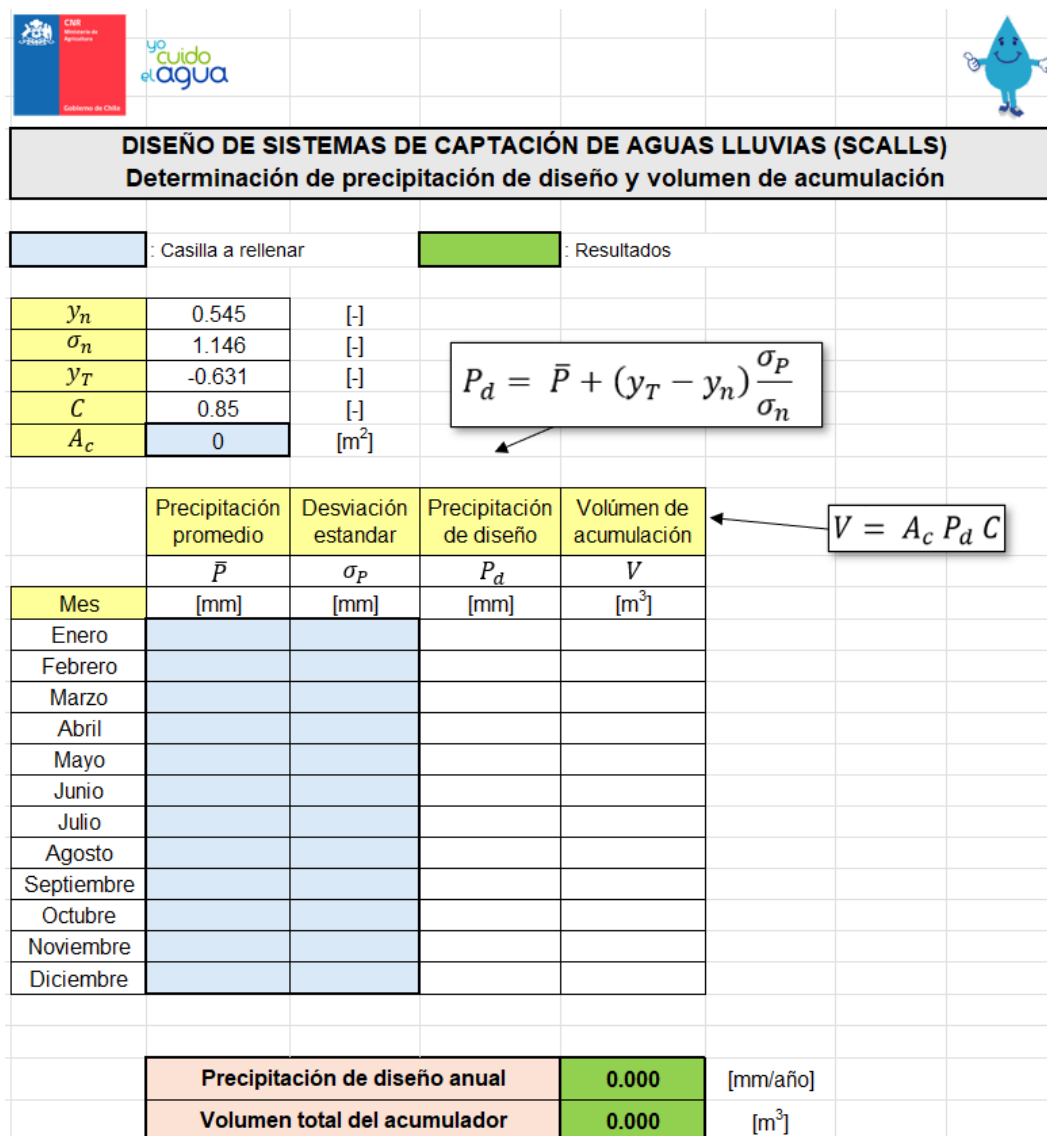
Los parámetros corregidos de Gumbel se obtienen de una regresión lineal de los datos tabulados en el Capítulo II (Figura 6), donde para $n = 42$ datos (número de años desde 1979 hasta el 2020) se obtiene:

$$y_n = 0,545 \quad y \quad \sigma_n = 1,146$$

Finalmente, para determinar el volumen del sistema de acumulación, se debe emplear la expresión $V = A_c P_d C$.



Para lo anterior, se dispondrá y trabajará con una planilla Excel, denominada **Diseño SCALLs**, la cual permite determinar la precipitación de diseño del sistema y el volumen de acumulación anual disponible para el proyecto. La Figura 29 muestra la visual general del Excel, dónde se aprecian cada uno de los atributos y variables asociadas al cálculo.



DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS (SCALLS)
Determinación de precipitación de diseño y volumen de acumulación

: Casilla a rellenar
 : Resultados

y_n	0.545	[-]
σ_n	1.146	[-]
y_T	-0.631	[-]
C	0.85	[-]
A_c	0	[m ²]

$$P_d = \bar{P} + (y_T - y_n) \frac{\sigma_P}{\sigma_n}$$


	Precipitación promedio	Desviación estandar	Precipitación de diseño	Volúmen de acumulación
	\bar{P}	σ_P	P_d	V
Mes	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				

$$V = A_c P_d C$$

Precipitación de diseño anual	0.000	[mm/año]
Volumen total del acumulador	0.000	[m ³]


Figura 29. Visual de planilla empleada en el Diseño de SCALLs. Fuente: Elaboración propia.


Paso 1: Indicar área de captación del SCALLs



Ministerio de Agricultura

Colaborando con Chile





DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS (SCALLS)

Determinación de precipitación de diseño y volumen de acumulación

Casilla a rellenar

Resultados

y_n	0.545	[-]
σ_n	1.146	[-]
y_T	-0.631	[-]
C	0.85	[-]
A_c	100	[m ²]

$$P_d = \bar{P} + (y_T - y_n) \frac{\sigma_P}{\sigma_n}$$

Figura 30. Área de captación en planilla de diseño SCALLs. Fuente: Elaboración propia.

Paso 2: Pegar valores procesados de Mawün en planilla de diseño

Luego de ingresar el área de captación en la planilla, debe copiar los valores de precipitación mensual y desviación estándar obtenidos del procesamiento de las series mensuales de precipitación (Excel descargado y trabajado desde Mawün), para luego, pegar las columnas en las casillas azules de la planilla de diseño, tal como se detalla en la Figura 31.

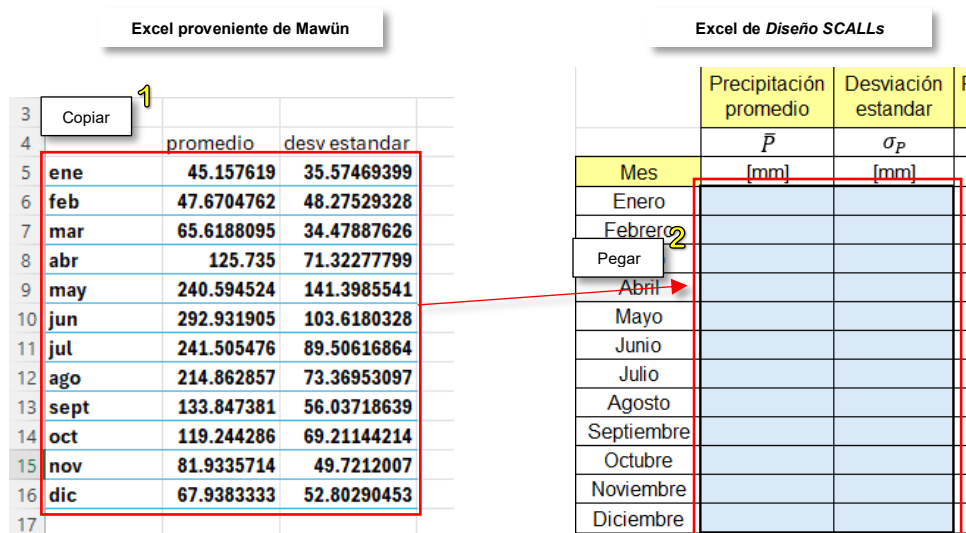


Figura 31. Proceso de datos de precipitación y desviación estándar de Mawün. Fuente: Elaboración propia.



Paso 3: Determinación de precipitación anual y volumen total del sistema de acumulación diseñado

Finalmente, al pegar los valores (paso previo) la planilla automáticamente calcula el valor de precipitación de diseño anual y el volumen total del acumulador. Debido a que la distribución puede arrojar valores negativos, la precipitación de diseño y el volumen para algunos meses del año puede reflejarse nulo en el cálculo. Todo lo anterior se ve detallado en la Figura 32, con un ejemplo de datos trabajados en capítulos pasados del anexo.

y_n	0.545	[-]	$P_d = \bar{P} + (y_T - y_n) \frac{\sigma_P}{\sigma_n}$	
σ_n	1.146	[-]		
y_T	-0.631	[-]		
C	0.85	[-]		
A_c	100	[m ²]		
	Precipitación promedio	Desviación estándar	Precipitación de diseño	Volumen de acumulación
	\bar{P}	σ_P	P_d	V
Mes	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]
Enero	45.1576	35.5747	8.652	0.735
Febrero	47.6705	48.2753	0.000	0.000
Marzo	65.6188	34.4789	30.237	2.570
Abril	125.7350	71.3228	52.545	4.466
Mayo	240.5945	141.3986	95.494	8.117
Junio	292.9319	103.6180	186.601	15.861
Julio	241.5055	89.5062	149.656	12.721
Agosto	214.8629	73.3695	139.573	11.864
Septiembre	133.8474	56.0372	76.343	6.489
Octubre	119.2443	69.2114	48.221	4.099
Noviembre	81.9336	49.7212	30.911	2.627
Diciembre	67.9383	52.8029	13.753	1.169
Resultados finales de diseño				
Precipitación de diseño anual		831.987	[mm/año]	
Volumen total del acumulador		70.719	[m ³]	

Figura 32. Ejemplo de cálculo final de precipitación de diseño anual y volumen total del acumulador.
Fuente: Elaboración propia.

Con todo lo anterior, del ejemplo se concluye que:

Al aplicar la distribución de Gumbel en la serie de datos procesada, se obtiene un volumen total potencial del sistema de almacenamiento de 70,719 m³, dada un área de captación de 100 m² y una precipitación de diseño anual de 831,987 [mm/año].



6. BIBLIOGRAFÍA

Cantaro Azul (2022). *Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) en la localidad de Canolal, Chenalhó*. <https://www.cantaroazul.org/post/sistemas-de-captaci%C3%B3n-de-agua-de-lluvia-scalt-en-la-localidad-de-canolal-chenalh%C3%B3>

Chow V., Maidment D. y Mays L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw-Hill.

INIA (2016). *Técnicas de captación, acumulación, y aprovechamiento de aguas lluvias*. Boletín INIA N° 321. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Rayentué. Rengo, Chile. 184p.

McPhee J. (2013). *Factores de Frecuencia e Intervalos de Confianza*. Curso de Hidrología CI5101. Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile.

Mendoza P., Lagos M. (2019). *Hidrología probabilística*. Curso de Hidrología CI5101. Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile.

UNESCO (2015). *Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile*. PHI-VIII. Documento Técnico n° 36.