



Hyperlocal Modeling: Reality or Wishful Thinking?

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo

Para optar al grado académico

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Carolina Trujillo Espinoza
Profesor Guía: Diego Rivera Salazar

Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo

Diciembre, 2023

Contenido

1	Introducción	6
1.1	Definición del problema	6
1.2	Hipótesis.....	7
1.3	Objetivos	7
1.4	Alcances.....	7
2	Revisión Bibliográfica	7
2.1	Modelamiento Hiper-local	7
2.2	Parámetros de Entrada para el Modelamiento	10
3	Metodología	12
3.1	Identificación de Datos.....	13
3.1.1	Análisis FAIR	13
3.1.2	Identificación de Variables Hidrológicas Esenciales.....	14
3.2	Análisis de Calidad de Base se Datos.....	15
3.2.1	Compleitud.....	15
3.2.2	Redundancia.....	15
3.3	Esquematización de Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal	15
3.3.1	Visualización de Datos.....	16
3.3.2	Análisis Estadístico	16
3.3.3	Tratamiento de Datos	16
3.3.4	Variogramas	17
4	Resultados y Discusión	18
4.1	Identificación de Bases de Datos en Chile.....	18
4.1.1	Análisis FAIR	21
4.1.2	Identificación de Variables Hidrológicas Esenciales.....	23
4.2	Estudio de Calidad de Base de Datos	25
4.2.1	Compleitud.....	25
4.2.2	Redundancia.....	27
4.2.3	Esquema Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal	29
4.2.4	Visualización de Datos.....	29
4.2.5	Análisis Estadístico	31
4.2.6	Tratamiento de Datos	34

4.2.7	Variogramas	35
5	Conclusiones	43
1	Anexo 1: Análisis Estadístico	48
2	Anexo 2: Transformación Logarítmica	49
2.1	Caudal Diario	50
2.2	Caudal Mensual Acumulado	59
3	Anexo 3: Análisis de Fluctuación Detrended (AFD).....	67
3.1	Caudal Diario	67
3.2	Caudal Mensual Acumulado	77

Índice de Ecuaciones

(1).....	10
(2).....	17
(3).....	17
(4).....	18

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal Característico (Bloschl & Sivapalan, 1995)	8
Ilustración 2: Procedimiento Metodológico.....	12
Ilustración 3: Análisis de Completitud por Estaciones	30
Ilustración 4: Estadística Datos Mensuales	32
Ilustración 5: Estadística Datos Diarios	33
Ilustración 6: Variograma Temporal Maule (días).....	35
Ilustración 7: Variograma Temporal Maule (meses)	36
Ilustración 8: Variograma Temporal Metropolitana (días).....	36
Ilustración 9: Variograma Temporal Metropolitana (meses).....	37
Ilustración 10: Variograma Espacial Maule (días)	37
Ilustración 11: Variograma Espacial Maule (meses).....	38
Ilustración 12: Variograma Espacial Metropolitana (días)	38
Ilustración 13: Variograma Espacial Metropolitana (meses)	39
Ilustración 14: Esquema Proceso Hidrológico Diario	41
Ilustración 15: Esquema Proceso Hidrológico Mensual	41
Ilustración 16: Esquema Proceso Hidrológico Espacio-Temporal	42

Índice de Tablas

Tabla 1: Definición de FAIR (Boeckhout et al., 2018)	14
Tabla 2: Plataformas de Datos en Chile	19
Tabla 3: Plataformas y sus Parámetros	20
Tabla 4: Análisis FAIR de Plataformas	22
Tabla 5: Número de Estaciones por Región	23
Tabla 6: Disponibilidad de EHV's.....	24
Tabla 7: Parámetros y Archivos para el Estudio.....	25
Tabla 8: Análisis de Completitud de Caudal, Región Metropolitana.....	26
Tabla 9: Análisis de Completitud de Caudal, Región del Maule.....	26
Tabla 10: Análisis de Redundancia de Caudal	27
Tabla 11: Comparación de Completitud por Periodos, Región Metropolitana.....	28
Tabla 12: Comparación de Completitud por Periodos, Región del Maule	28
Tabla 13: Resumen Desviación Estándar	31
Tabla 14: Cantidad de Datos Cero en Bases de Datos.....	34
Tabla 16: Estadística Datos Mensuales Región Metropolitana.....	48
Tabla 17: Estadística Datos Diarios Región Metropolitana	48
Tabla 18: Estadística Datos Mensuales Región del Maule	49
Tabla 19: Estadística Datos Diarios Región del Maule	49

1 Introducción

1.1 Definición del problema

El agua, un recurso esencial para la supervivencia y el desarrollo humano, juega un papel fundamental en una amplia gama de actividades que van desde la producción industrial hasta la seguridad alimentaria y la higienización de ambientes. Sin embargo, la distribución no homogénea de agua en el tiempo y el espacio, sumado a la creciente presión de la población en crecimiento y las actividades económicas, presenta desafíos significativos en la gestión de este recurso vital (Gerlak et al., 2018; Lim et al., 2018).

La necesidad de una gestión hídrica efectiva se vuelve más apremiante en un escenario donde el agua disponible para el consumo humano y la producción constituye una fracción mínima del agua dulce total en el planeta. A medida que el consumo de agua dulce continúa en aumento y los ecosistemas acuáticos se ven amenazados, se vuelve imperativo adoptar enfoques más informados y tecnológicamente avanzados para garantizar la sostenibilidad del recurso (Kumar et al., 2020; Mekonnen & Hoekstra, 2016) .

En este contexto, la gestión eficiente de los recursos hídricos requiere herramientas que permitan comprender y modelar los procesos hidrológicos a nivel local y detallado. Los modelos hidrológicos hiper-locales emergen como una respuesta prometedora para analizar comportamientos específicos en áreas determinadas, superando las limitaciones de los modelos a gran escala (Beven & Cloke, 2012; Bierkens, 2015). Estos modelos, que consideran características específicas como topografía, vegetación y condiciones climáticas locales, proporcionan una visión detallada que puede informar decisiones más precisas y contextualizadas en la gestión del agua. Sin embargo, la implementación efectiva de estos modelos enfrenta un desafío crucial; la disponibilidad y calidad de los datos hidrológicos necesarios para modelamiento.

La obtención de datos precisos, a menudo en tiempo real, representa una barrera para la implementación exitosa del modelamiento. En este sentido, los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) emergen como una solución potencial, al establecer directrices para la administración y compartimiento de datos hidrológicos que podrían alimentar estos modelos avanzados (Boeckhout et al., 2018).

La gestión eficiente de los recursos hídricos en un mundo en cambio requiere un marco integral que combine el conocimiento tradicional con las herramientas tecnológicas más avanzadas. Los modelos hidrológicos hiper-local y los principios FAIR ofrecen directrices clave para superar los desafíos actuales en la gestión del agua, permitiendo una comprensión más detallada y una toma de decisiones informada. La colaboración entre la ciencia, la tecnología y la gobernanza es esencial para garantizar la disponibilidad y sostenibilidad del recurso hídrico en un futuro incierto.

1.2 Hipótesis

Se plantea la hipótesis expresada a continuación.

Ho: Actualmente, en Chile, no es posible realizar modelos hidrológicos hiper-local.

A lo largo de este estudio, se analizan las variables involucradas, así como sus relaciones subyacentes, entendiendo las grandes diferencias climatológicas entre las zonas norte y sur del país, por lo cual los procedimientos de análisis en el estudio dependerán de las características de los datos disponibles.

1.3 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo principal determinar la factibilidad de implementar modelación hidrológica hiper-local en Chile, de acuerdo a los datos de observaciones puntuales disponibles en la actualidad.

Los objetivos específicos son:

- Realizar un estudio bibliográfico de los modelos hidrológicos hiper-locales.
- Evaluar la disponibilidad y calidad de los datos meteorológicos y climáticos en Chile.
- Estimar la resolución espacial y temporal de dichos datos al ser utilizados para modelamiento hidrológico.

1.4 Alcances

No es parte del alcance de nuestra propuesta: (1) la creación de modelos hidrológicos, (2) la comparación de los resultados entre modelos hidrológicos existentes. Esto se debe a que el tiempo asignado para este estudio es limitado, y nuestro enfoque principal es la evaluación de datos, lo que requiere un análisis detenido y completo. Además, la falta de recursos computacionales y datos disponibles para llevar a cabo un análisis comparativo entre modelos hidrológicos existentes impide su inclusión en esta propuesta.

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Modelamiento Hiper-local

El modelamiento hiper-local se define como la utilización de modelos a una escala detallada y específica, teniendo en cuenta características particulares de un área, como la topografía, la vegetación y las condiciones climáticas locales. Estos modelos tienen como objetivo lograr una representación de los procesos hidrológicos en esa área particular. Dicho objetivo involucra un análisis que busca una mayor comprensión de los fenómenos hidrológicos a nivel local, haciendo posible datos de salida con mayor resolución, lo cual puede implicar un aumento en la comprensión de la compleja interacción de heterogeneidad dentro del sistema hidrológico (Aerts et al., 2022).

La modelación hiper-local en hidrología se basa en la idea de utilizar múltiples hipótesis o representaciones alternativas para describir los procesos hidrológicos en un área determinada.

Esta aproximación se fundamenta en la comprensión de que existen incertidumbres y ambigüedades en la representación de los procesos ambientales, debido a la complejidad y heterogeneidad de los sistemas naturales (Clark et al., 2011). Un ejemplo es Chile, donde los estudios climáticos están sujetos a las singularidades fisiográficas de la región andina, las que demandan datos de alta resolución sobre aspectos como topografía, tipos de suelo y patrones de uso de tierras (Condom et al., 2020).

El estudio de Blöschl y Sivapalan (1995) aborda los temas de escalamiento en la modelación hidrológica, presentando un esquema que relaciona las resoluciones espaciales y temporales en hidrología (Ilustración 1). La relación esquemática ilustra cómo, al reducirse la escala espacial, también disminuye la escala temporal, indicando que áreas pequeñas deben tener intervalos de tiempo más cortos de observaciones para procesos hidrológicos. Se destaca, además, los desafíos y limitaciones vinculados a compensaciones entre complejidad del modelo y disponibilidad de datos, y las incertidumbres introducidas por la agregación o desagregación de datos en diferentes escalas (Blöschl & Sivapalan, 1995).

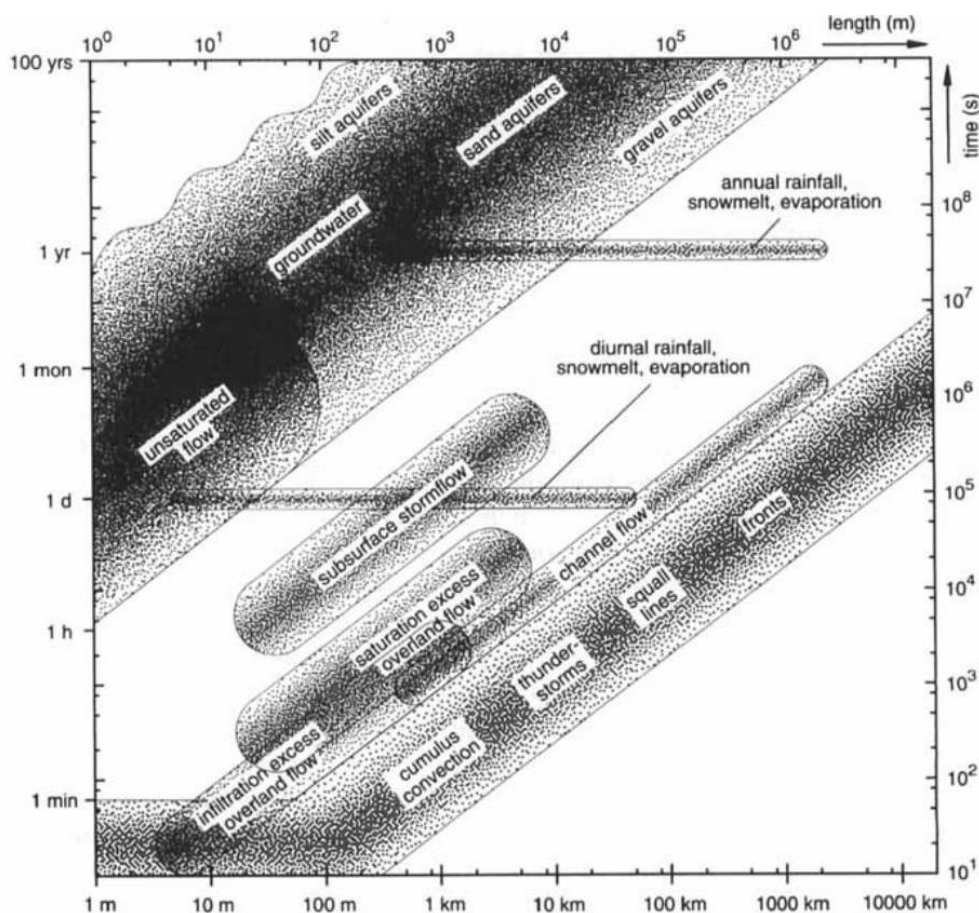


Ilustración 1: Esquema Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal Característico (Blöschl & Sivapalan, 1995)

La relación esquemática entre escalas espacial y temporal en hidrología proporciona un marco esencial para comprender las conexiones y equilibrios en la modelización hidrológica, cuya metodología es utilizada en otras investigaciones. Mientras que Skøien et al. (2003) profundizan en conceptos cruciales como escala y magnificación, explorando cómo la variabilidad de las cuencas influye en dichos conceptos, investigaciones más recientes han abordado cómo, por ejemplo, la variación espacial interviene en la estimación del intercambio de calor y humedad entre la tierra y la atmósfera. Específicamente, para resoluciones espaciales que se aproximan e incluso son inferiores a los 100m, la advección horizontal no puede ser desconsiderada frente al gradiente vertical, como se destaca en (Holtslag et al., 2013).

La falta de popularización del modelamiento hiper-local en hidrología se atribuye a varios desafíos que han persistido en el transcurso de más de una década de búsqueda y desarrollo en este campo (Hoch et al., 2023; R. Van Beek et al., 2023). Entre los obstáculos clave se encuentra la necesidad de datos meteorológicos de alta resolución (Bierkens, 2015), así como la demanda computacional que conlleva el almacenamiento y procesamiento de estos datos (Kollet et al., 2010; Maxwell, 2013). Otro obstáculo es la incertidumbre sobre los datos de entrada, así como la incertidumbre sobre los métodos matemáticos utilizados en el modelo.

En relación a la incertidumbre de los datos de entrada, esta puede ser epistémica o de medición. La incertidumbre epistémica surge al escalar procesos y parámetros hidrológicos a niveles de resolución muy altos. Generalmente, esta incerteza proviene de la falta de conocimiento sobre estos procesos y parámetros en resoluciones tan detalladas (Beven & Cloke, 2012). La incertidumbre de la medición se refiere a la duda que existe sobre el resultado de cualquier medición, especialmente cuando son adquiridas de forma indirecta, como en conjuntos de datos de alta resolución sobre topografía, uso del suelo, geología y propiedades del suelo, que pueden contener imprecisiones debido a métodos de teledetección, modelos de superficie terrestre y técnicas estadísticas de reducción de escala (Aerts et al., 2021).

En relación a la incertidumbre sobre los métodos matemáticos utilizados en el modelo, estas pueden ocurrir por la variación de la resolución espacial, generando una necesidad por modelos conjuntos de múltiples escalas para mejorar la capacidad predictiva (Aerts et al., 2022). Por ejemplo, modelos a una escala de 0,5° (alrededor de 50 km en el Ecuador) asumen que la demanda de agua se satisface localmente, pero a resoluciones de 10 km o más, es necesario considerar la redistribución del agua entre celdas desde puntos de extracción hasta lugares críticos de consumo o a través de flujos subterráneos (Krakauer et al., 2014).

Más allá de la incertidumbre, los modelos hidrológicos hiper-locales pueden fallar en cuanto a sus resultados. Esta situación posiblemente ocurre por selección inadecuada del modelo utilizado. Algunos modelos hidrológicos pueden ser aplicados en diferentes áreas con características específicas, pero es importante considerar si el modelo seleccionado es apropiado para la zona de estudio. Utilizar un modelo que no se ajuste a las características hidrológicas de la cuenca puede llevar a resultados incorrectos (Ortega Ana & Treminio, 2022).

En conjunto, estos desafíos han contribuido a la continua investigación y desarrollo en el campo de la modelización hiper-local en hidrología, impidiendo su adopción generalizada hasta el momento. A pesar de la poca implementación generalizada de modelos de hiper-resolución, se han llevado a cabo varios esfuerzos para proporcionar información hidrológica a nivel local y mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos involucrados (Hoch et al., 2023). Varios modelos hidrológicos han demostrado avances significativos en términos de resolución espacial y temporal. Por ejemplo, WaterGAP y PRC- funcionan a una resolución de 5 minutos globalmente (Kaspar et al., 2003; L. P. H. Van Beek et al., 2011). Éste último fue acoplado al modelo MODFLOW para lograr 1 km de resolución a nivel mundial (de Graaf et al., 2017). Otros modelos, tales como LISFLOOD ya funcionan a 6 minutos globalmente, mientras que NOAH-MP acoplado a Dynamic TOPMODEL logra realizar simulaciones continentales de 30 m (Niu et al., 2011).

Otros modelos de hiper-resolución incluyen plataformas de base física, como Terrestrial Systems Modeling Platform (TerrSysMP), un modelo de suelo-vegetación-atmósfera implementado en Europa (Keune et al., 2016), o ParFlow v3 (Maxwell et al., 2015; O’neill et al., 2021), un modelo que integra aguas subterráneas-superficiales sobre el territorio continental de Estados Unidos, similar a National Water Model v2.0 (Bierkens et al., 2015; O’neill et al., 2021).

Al momento de evaluar los resultados de algunos modelos mencionados, se encuentran resultados no prometedores. Por ejemplo, PCR-GLOBWB logró reproducir adecuadamente las anomalías de almacenamiento de agua terrestre (TWS) en las principales cuencas fluviales del mundo. Sin embargo, solo el 40% de las ubicaciones de descarga obtuvieron un coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) mayor a 0,3, lo que sugiere un rendimiento insatisfactorio en la mayoría de las estaciones GRDC (Bai et al., 2016). En contraste, los resultados recientes de streamflow de WaterGAP2.2d son alentadores, con una mediana de KGE de 0,79 y una medida de sesgo casi óptima. Sin embargo, se observó que este modelo subestimó la amplitud y la tendencia de TWS en la mayoría de las cuencas (Müller Schmied et al., 2021).

2.2 Parámetros de Entrada para el Modelamiento

Las Variables Hidrológicas Esenciales (EHVs) conforman el conjunto parámetros para comprender los procesos hidrológicos en una región específica, de acuerdo a la ecuación 1 de balance hídrico, donde P es la precipitación, E_T la evapotranspiración, R_s corresponde a la escorrentía superficial y R_g a la escorrentía subterránea. Mientras que Y el rendimiento hídrico total (Eagleson, 1978). La importancia de estas variables radica en su influencia dentro de la investigación y gestión de los recursos hídricos, ya que proporciona información esencial sobre la disponibilidad del agua, así como los flujos y ciclos hidrológicos (Giuliani et al., 2020). Por esto, las EHVs se utilizan ampliamente en la modelización hidrológica (Scherer et al., 2020).

$$P - E_T = R_s + R_g = Y \quad (1)$$

Las EHV's comprenden varios elementos cruciales en el estudio de los procesos hidrológicos y dinámicas de una cuenca o área de captación. Si bien estas variables consideran los parámetros bases para el modelamiento hidrológico, la selección de qué variables utilizar dependerá de los requerimientos de cada estudio, como se mencionó en el ejemplo de Krukauer (2014), donde un modelo a escala de 10 [km] debe considerar adicionalmente la infiltración en alta resolución.

A continuación, se presentan las variables hidrológicas esenciales:

- *Caudal (Streamflow)*: El caudal se refiere al volumen de agua que fluye en un flujo superficial, como ríos o arroyos, durante un período específico. Es fundamental en hidrología, ya que representa el movimiento del agua a través del sistema hidrológico (de Souza & Reis, 2022).
- *Precipitación*: La precipitación es el proceso mediante el cual el agua cae de la atmósfera a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo. Constituye la principal entrada al sistema hidrológico (Rahman et al., 2019).
- *Evapotranspiración*: La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie terrestre y la transpiración de las plantas. Representa la pérdida de agua desde la superficie del suelo hacia la atmósfera y es un componente importante del ciclo del agua (Kumari & Srivastava, 2020).
- *Infiltración*: La infiltración se refiere al proceso mediante el cual el agua ingresa al suelo desde la superficie. Es esencial en hidrología, ya que determina la cantidad de agua que puede almacenarse en el suelo y contribuye a la recarga de aguas subterráneas (Lilhare et al., 2020).
- *Aguas subterráneas (Groundwater)*: Las aguas subterráneas se almacenan bajo la superficie terrestre en acuíferos subterráneos. Son un componente importante del sistema hidrológico, pues proveen una fuente de agua para arroyos, ríos y pozos (Lilhare et al., 2020).

Es importante señalar que la medición o el cálculo de estas variables hidrológicas pueden verse influidos por diversas incertidumbres y limitaciones, como la disponibilidad de datos, la variabilidad espacial y temporal, así como los supuestos del modelo. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta estas incertidumbres al interpretar y utilizar los datos hidrológicos con fines de gestión y planificación del agua (Chandra Rupa & Mujumdar, 2019).

Las EHV's resultan fundamentales para entender y modelar los procesos hidrológicos y dinámicas de una cuenca o área de captación. Se emplean en diversos modelos y análisis hidrológicos para evaluar la disponibilidad de agua, pronósticos de inundaciones, gestión de recursos hídricos y evaluaciones de impacto ambiental. La estimación y monitorización precisa de estas variables son esenciales para una gestión y planificación del agua efectiva (Shen et al., 2022). En paralelo, los datos hidrológicos desempeñan un rol crucial en estos análisis y decisiones de gestión del agua, permitiendo una comprensión profunda de los procesos hidrológicos. Sin embargo, la incertidumbre inherente a los datos puede introducir errores y distorsionar interpretaciones (McMillan et al., 2018). Para abordar este desafío, es imperativo que los datos hidrológicos adhieran a los principios FAIR para la administración de datos.

Los principios FAIR, que significan facilidad de búsqueda (*Findability*), accesibilidad (*Accessibility*), interoperabilidad (*Interoperability*) y reutilización (*Reusability*), proporcionan un marco para hacer que los datos sean más accesibles y utilizables (Boeckhout et al., 2018). De acuerdo a la definición dada por Boeckhout, la interoperabilidad se refiere a la habilidad de sistemas y plataformas distintas para intercambiar y utilizar datos. En el ámbito de los datos hidrológicos, esto asegura su integración con otros conjuntos, facilitando análisis exhaustivos y una comprensión más profunda de los procesos hidrológicos. Por otro lado, la reutilización de los datos se refiere a la facilidad que da a los investigadores de construir sobre conjuntos existentes, fortalecer análisis y validar descubrimientos previos, lo que en última instancia impulsa el progreso científico en la investigación hidrológica.

En el contexto de los datos hidrológicos, estos principios pueden ayudar a mejorar la calidad y fiabilidad de los datos, lo que conduce a una mejor investigación hidrológica y gestión del agua.

3 Metodología

La metodología presentada ha sido desarrollada con el propósito de analizar las bases de datos climáticas disponibles en Chile. Este análisis tiene como objetivo evaluar la posibilidad de realizar modelación hidrológica a nivel hiper-local en el contexto nacional, utilizando los datos obtenidos de las observaciones puntuales de variables climáticas que están actualmente disponibles. El enfoque del estudio se concentra en las regiones que cuentan con una mayor cantidad de datos. El proceso metodológico detallado se describe en la Ilustración 2.

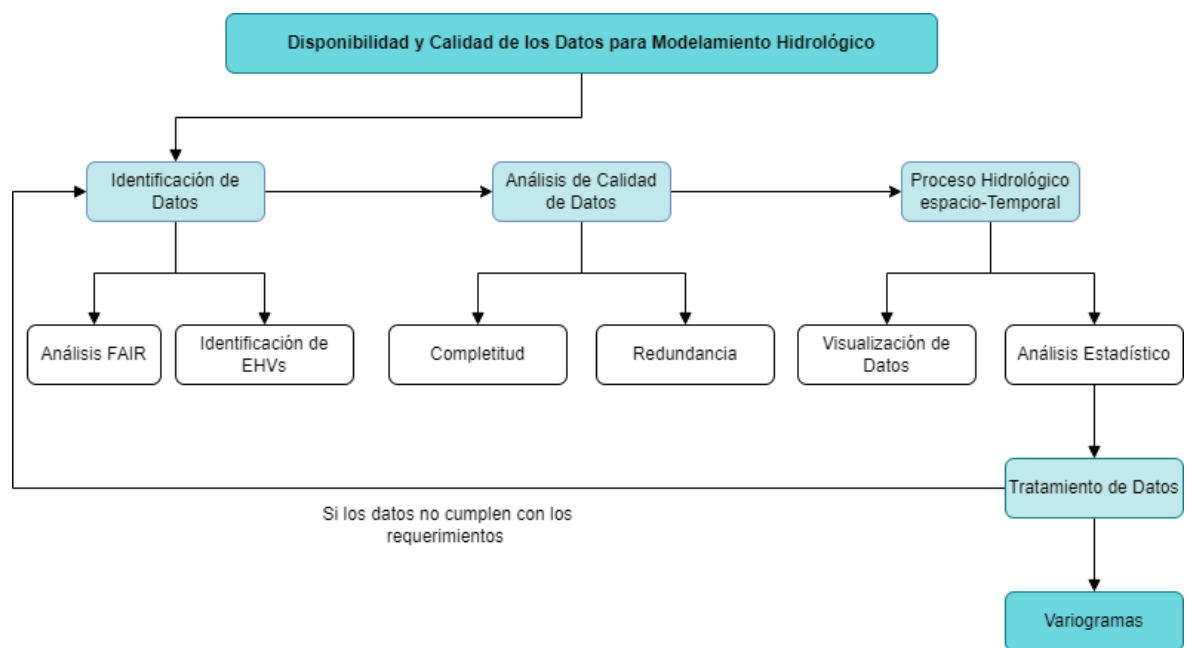


Ilustración 2: Procedimiento Metodológico

3.1 Identificación de Datos

En esta fase inicial, se procede a identificar las bases de datos climáticas disponibles en Chile. Este proceso se fundamenta en las bases de datos utilizadas en el Balance Hídrico Nacional (Ximena Vargas M et al., 2017) y el Informe de Homologación del Cálculo Hidrológico (Ximena Vargas Mesa, 2022), dos fuentes de gran relevancia en la estimación histórica y futura de la oferta de agua en Chile. El objetivo principal es garantizar que se cuenten con bases de datos exhaustivas y representativas, proporcionando así una base sólida para el análisis de viabilidad de la modelación hidrológica hiper-local en el país.

Es importante destacar que en este análisis se restringe la consideración de variables hidrológicas esenciales únicamente a las observaciones puntuales disponibles en las bases de datos de Chile. Esta elección se fundamenta en la necesidad de enfocar y delimitar el estudio en la información específica y bien documentada que se encuentra registrada en las fuentes de datos chilenas. La razón detrás de esta limitación es asegurar que las conclusiones y resultados derivados del estudio estén respaldados por información confiable y validada, proveniente de fuentes reconocidas en el campo de la observación y el registro de eventos hidrológicos en el contexto geográfico de Chile.

3.1.1 Análisis FAIR

Se procede a evaluar las bases de datos bajo los principios FAIR. Se verifica la facilidad para encontrar y acceder a los datos, la interoperabilidad de los formatos y la reusabilidad de los mismos en diferentes contextos. Se definen criterios para cada principio y se priorizan las bases de datos que mejor se ajustan a estos atributos. Los criterios utilizados se basan en el estudio de Boeckhout (2018) y se resumen en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1: Definición de FAIR (Boeckhout et al., 2018)

<i>Findability</i>	Almacenamiento Público	Datos compartidos públicamente sin restricción
<i>Accessibility</i>	Acceso claro	Están las instrucciones necesarias para localizar a los datos deseados
	Procedimiento definido	El procedimiento para la ubicación y descarga de datos no varía
	Nivel de automatización de descarga	Cantidad de selecciones necesarias para descargar datos
<i>Interoperability</i>	Estandarización	Cuenta con conceptos y unidades estándar para cada EHV
	Uniformidad de variables	Existe consistencia de las variables monitoreadas entre las estaciones
	Uniformidad de periodos	Existe consistencia del periodo de observaciones entre estaciones y variables
	Estándar de archivos	El formato de descarga es amigable (Excel o CSV)
<i>Reusability</i>	Acceso a metadata	Se entrega de la información de: intervalo de observaciones, nombre de la estación, ubicación, ID, fuente
	Descripción de procesamiento de datos	Se explica la metodología para la toma de datos o su procesamiento
	Definición de incertidumbres	Se entregan las incertidumbres o errores de las mediciones

3.1.2 Identificación de Variables Hidrológicas Esenciales

Una vez que se ha completado la identificación de las bases de datos disponibles, el siguiente paso implica la búsqueda y extracción de las variables meteorológicas y pluviométricas de interés (EHVs) que previamente se han definido en la sección 2.2. En este contexto, se procede a acceder a todas las plataformas que almacenan datos de forma pública, según el análisis FAIR.

Dado que la distribución de estaciones meteorológicas y pluviométricas en el país no es homogénea, se enfoca el estudio en un conjunto específico de regiones durante esta etapa y las fases subsiguientes. Para ello, se seleccionan las dos regiones con la mayor cantidad de estaciones en Chile Continental, basándose en el registro de estaciones proporcionado por la DGA.

La elección de estas dos regiones busca asegurar la representatividad en términos de máxima disponibilidad y densidad de datos en el país.

3.2 Análisis de Calidad de Base se Datos

En la segunda fase del estudio, se ejecuta un análisis de calidad sobre las bases de datos climáticas previamente identificadas, enfocando la atención en dos atributos críticos: la completitud y la redundancia de los datos. La completitud se refiere a la presencia de un conjunto de datos íntegro y sin omisiones, asegurando que toda la información necesaria para realizar análisis pertinentes esté disponible. Por otro lado, la redundancia se refiere a la repetición de datos, lo cual podría afectar la precisión y eficiencia de los análisis realizados sobre la base de datos. Estos atributos se abordan tanto a nivel regional, considerando las dos regiones seleccionadas del país, como a nivel específico para cada una de las Variables Hidrometeorológicas Esenciales (EHVs) presentes en las bases de datos.

La combinación de estos análisis brinda una visión holística en cuanto a la fiabilidad y coherencia de las bases de datos.

3.2.1 Completitud

Se procede a realizar un análisis de la completitud de los registros de datos presentes en cada una de las bases de datos identificadas. Este proceso implica la identificación de posibles intervalos de tiempo con datos faltantes o con valores que se encuentran registrados como "NA" (No Disponible). El objetivo principal es evaluar si los registros son suficientes para llevar a cabo el análisis previsto en el estudio. En este contexto, "suficientes" implica que la cantidad de datos disponible es óptima para garantizar la fiabilidad y validez de las conclusiones derivadas del análisis.

Para lograr este propósito, se someten las series de tiempo de cada base de datos a un examen programado utilizando Python. En él se verifica la coherencia temporal de los registros, buscando inconsistencias o intervalos en los cuales no se cuenten con datos registrados.

3.2.2 Redundancia

Se examina si existen registros de datos duplicados o redundantes en diferentes bases de datos. La presencia de duplicados podría generar inconsistencias y sesgos en los resultados, por lo que se lleva a cabo un proceso de depuración y eliminación de dichos duplicados.

3.3 Esquematización de Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal

En esta tercera etapa del estudio, se procede a abordar el análisis tanto espacial como temporal de los datos recolectados. El objetivo principal es construir un esquema de Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal, siguiendo la metodología propuesta por Skøien (2003). Esta metodología busca establecer una representación gráfica que ilustre la resolución de distancia-tiempo de los datos climáticos bajo consideración.

La construcción de este esquema se basa en la identificación de patrones cíclicos y tendencias de comportamiento en la distribución espacial y temporal de los datos climáticos. Mediante herramientas de visualización y análisis geoespacial, se busca determinar cómo se distribuyen los datos climáticos en el espacio y cómo varían a lo largo del tiempo en el contexto de los procesos hidrológicos.

La metodología de Skøien (2003) provee un marco analítico sobre las relaciones entre la distancia geográfica y el tiempo en el contexto de las variables climáticas. Esto ofrece una perspectiva más profunda sobre las características de distribución y frecuencia de muestreo entre las observaciones puntuales.

3.3.1 Visualización de Datos

Se realiza la visualización de los datos de forma temporal y espacial, con el propósito de comprender su distribución y comportamiento.

En referencia a la visualización de distancias espaciales, se emplea la herramienta ArcGIS, la cual permite identificar las distancias existentes entre las estaciones que están siendo consideradas en el estudio. La visualización de los datos es fundamental para obtener una representación gráfica de cómo están distribuidas las estaciones meteorológicas y pluviométricas en el espacio geográfico. Esta representación permite identificar la proximidad o separación entre las diferentes estaciones, lo cual puede influir en la variabilidad climática y en la forma en que se registran los eventos meteorológicos en las distintas ubicaciones.

3.3.2 Análisis Estadístico

Se procede a realizar un análisis básico de estadísticas descriptivas para cada una de las variables hidrometeorológicas en estudio, separadas por región. Este análisis busca obtener una comprensión inicial de las características centrales y de dispersión de los datos recopilados.

En primer lugar, se calcula el valor promedio de cada variable. En segundo lugar, se calcula la dispersión de los datos, lo cual entrega información sobre cuánto se desvían los valores individuales en relación a la media. Este análisis de estadísticas descriptivas nos brinda una visión general de la variabilidad y la distribución de los datos para cada variable en estudio. Además, permite identificar los mejores métodos para la transformación de datos previo al cálculo de variogramas.

3.3.3 Tratamiento de Datos

De acuerdo a Skøien (2003), el procesamiento de los datos climáticos para el cálculo de variogramas consiste en; transformación logarítmica, eliminación de tendencias con sustracción de media y finalmente división por dispersión la división de la serie por la desviación estándar.

Estas técnicas contribuyen a mitigar posibles sesgos, eliminando la tendencia temporal presente en los datos y entregando una serie de datos estacionaria. Sin embargo, es importante destacar que la definición precisa de estos procedimientos dependerá en gran medida de las características específicas de los datos encontrados para el estudio. Por ejemplo, en la zona norte, las precipitaciones tienden a ser mayoritariamente ceros, por lo cual basar su tratamiento en una transformación logarítmica seguida de sustracción pueda generar complicaciones en etapas posteriores del estudio. Por lo tanto, el detalle y la adecuación de estos procedimientos se determinarán en las secciones posteriores una vez que se haya identificado y analizado detenidamente el tipo de datos con el que se está trabajando en cada contexto particular.

3.3.4 Variogramas

La metodología descrita incorpora el cálculo de variogramas en un enfoque espacio-temporal para evaluar la factibilidad de modelamiento hiper-local. Para ello, se emplean tres ecuaciones específicas para obtener los variogramas temporal (γ_t) y espacial (γ_s), los cuales reflejan las variaciones de la variable transformada en función de desfases temporales y espaciales, respectivamente.

En el caso del variograma temporal (ecuación 2), se calcula considerando el desfase temporal (h_t), el valor transformado de la variable ($u(x_j, t_i)$) en un instante t_i y la ubicación espacial x_j de la estación j . La ecuación pondera las diferencias al cuadrado entre los valores transformados para diferentes pares de tiempos con el mismo desfase temporal. Similarmente, en el variograma espacial (ecuación 3), se utiliza el desfase espacial (h_s), el valor transformado de la variable en dos localizaciones espaciales distintas ($u(x_j, t_i)$ y $u(x_j + h_s, t_i)$) y el número de pares con desfase espacial h_s . Estas ecuaciones cuantifican cómo los valores transformados se distancian entre sí en función de la distancia temporal y espacial.

$$\gamma_t(h_t) = \frac{1}{\sum_{j=1}^m 2n_j(h_t)} \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j(h_t)} [u(x_j, t_i + h_t) - u(x_j, t_i)]^2 \quad (2)$$

$$\gamma_s(h_s) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m'} 2n_i(h_s)} \cdot \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{n_i(h_s)} [u(x_j + h_s, t_i) - u(x_j, t_i)]^2 \quad (3)$$

Posteriormente, se establece una relación entre los variogramas temporal y espacial (γ_t y γ_s) mediante la ecuación 4, donde T representa la escala temporal y L la escala espacial. Esta relación implica que las escalas características espacio-temporales pueden ser representadas en un gráfico logarítmico doble. Si la relación se traza como una línea recta en dicho gráfico, se puede inferir una ley de potencia que relaciona las escalas espaciales y

temporales. Esta relación permite comprender cómo las mediciones se correlacionan entre sí y puede tener implicaciones físicas relevantes, como la velocidad característica de propagación de perturbaciones en un sistema.

$$\gamma_t(T) = \gamma_s(L) \quad (4)$$

Finalmente, la relación de resolución espacio-temporal obtenida será comparada en el Esquema de Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal Característico (Bloschl & Sivapalan, 1995) (ilustración 1). Esto, con el objetivo de determinar la factibilidad de realizar modelamiento hidrológico, en diferentes escalas de espacio y tiempo, según las observaciones puntuales disponibles.

4 Resultados y Discusión

4.1 Identificación de Bases de Datos en Chile

Las plataformas de bases de datos disponibles en Chile se resumen en La Tabla 2 junto a sus características básicas.

Tabla 2: Plataformas de Datos en Chile

Plataforma	Objetivo	Estaciones	Propietario	Fuente
Agroclima	Información y predicción para agricultura	20 estaciones entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía	Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF)	Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC)
Agromet	Información para agricultura	424 estaciones nivel nacional	Ministerio de Agricultura	INIA, Asociación de Exportadores de Frutas de Chile (ASOEX) y FDF
Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SinCa)	Monitoreo de calidad de aire	219 estaciones nivel nacional	Ministerio de Medio Ambiente	Ministerio de Medio Ambiente
Meteovid (MTV)	Información y predicción para sector vitivinícola	47 estaciones entre las regiones de Valparaíso y Biobío	Consortios Tecnológicos Vinnova y Tecnovid	INIA, ASOEX y FDF
Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)	Información para las decisiones agrícolas y acuícolas en la región de Coquimbo	55 estaciones en la región de Coquimbo	Centro Regional de Investigación Científica y Tecnológica en la Región de Coquimbo	INIA
Dirección General de Aguas (DGA)	Monitoreo de recursos hídricos en el país	aproximadamente 500 estaciones a nivel nacional	Ministerio de Obras Públicas	DGA
Dirección Meteorológica de Chile (DMC)	Información climática	1427 estaciones lo largo del país	Dirección de Aeronáutica Civil	DMC y DGA
CR2MET	Información para profesionales de meteorología	1427 estaciones a nivel nacional	Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)	DMC y DGA

Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies, Chile Dataset (CAMELC-CL)	Información para análisis e investigación climática	1427 estaciones lo largo del país	CR2	DMC y DGA
--	---	-----------------------------------	-----	-----------

Los parámetros meteorológicos y pluviométricos disponibles en las plataformas, junto a su formato de descarga se muestran en La Tabla 3.

Tabla 3: Plataformas y sus Parámetros

Plataforma	Parámetros	Máxima Resolución	Descarga de Datos
Agroclima	Temperatura [°C], Humedad relativa [%], Precipitación [mm], Radiación Solar [W/m2], Presión atmosférica [mbar], Velocidad de viento [m/s]	Diaria	No disponible. Sólo visualización de datos por estación y parámetro
Agromet	Temperatura ambiental [°C], Temperatura de la superficie de suelo [°C], Temperatura a 10cm bajo suelo [°C], Humedad relativa [%], Precipitación [mm], Radiación Solar [W/m2], Presión atmosférica [mbar], Velocidad de viento [km/hr]	Horaria	Disponible en formato Excel y CSV, por estación y parámetro
SinCa	Contaminantes ambientales y, en algunos casos, Radiación global [W/m2], Temperatura [°C], Humedad relativa [%], Velocidad y dirección de viento	Diaria	Disponible en formato PDF, Excel y CSV, por estación y parámetro
Meteovid			Sin acceso público
CEAZA			No disponible. Sólo visualización de datos e informe.
DGA	Temperatura [°C], Humedad relativa [%], Precipitación [mm] y, en algunos casos, Caudal [m3/s]	Diaria	Formato CSV, por estación y parámetro

DMC	Temperatura [°C], Humedad relativa [%], Precipitación [mm], Radiación Solar [W/m ²], Presión atmosférica [mbar], Velocidad de viento [m/s], Caudal [m ³ /s]	Diaria	Impresión de tabla de datos en formato PDF, por estación
CR2MET	Precipitación [mm], Caudal [m ³ /s], Temperatura media, máxima y mínima [°C]	Diaria	Disponible en formato Excel y CSV, por estación y parámetro
CAMELC-CL	Caudal [m ³ /s], escorrentía [mm/d], Temperatura media, máxima y mínima [°C], Evapotranspiración Potencial (modelo de Hargreaves and Samani (1985)), Precipitación [mm] por medición puntual y modelada por (TMPA 3B42v7 (Huffman et al., 2007, 2010), CHIRPSv2 (Funk et al., 2015) y MSWEPv1.1 (Beck et al., 2017))	Diaria	Disponible en formato CSV, con todos los parámetros para la cuenca o DB nacional completa

Se observa que la mayoría de las fuentes para las distintas plataformas provienen de la información de estaciones gestionadas por DMC, INIA y DGA. Sin embargo, la variación en el diseño y usabilidad de cada plataforma impacta la simplicidad del proceso de búsqueda y descarga de datos. En este sentido, se plantea la oportunidad de llevar a cabo un análisis estandarizado de la facilidad y coherencia de cada base de datos utilizando los principios FAIR.

4.1.1 Análisis FAIR

El análisis con los principios FAIR de cada base de datos se resume en La Tabla 4, donde las "X" representan la ausencia del atributo evaluado.

En las plataformas Agroclima, Meteovid y CAEZA, no se pudo llevar a cabo la descarga de datos. Agroclima carece de la función de descarga, Meteovid no proporciona acceso público a los datos y, aunque la plataforma CAEZA permite la descarga de informes en formato PDF sobre las condiciones climáticas de meses anteriores, su navegación es complicada para la descarga de datos históricos.

Tabla 4: Análisis FAIR de Plataformas

FAIR		Agrocli ma	Agrom et	Sin Ca	MT V	CEAZ A	DG A	DM C	CR2M ET	CAME LS- CL
Findability	Almacenamiento Público	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
Accessibility	Acceso claro	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓	✓
	Procedimiento definido	✓	✓	X	X	✓	X	✓	✓	✓
	Nivel de automatización de descarga	X	4	5	X	X	4	4	3	3
Interoperability	Estandarización	X	X	X	X	X	X	X	✓	✓
	Uniformidad de variables	✓	✓	X	X	✓	X	✓	X	✓
	Uniformidad de periodos	X	X	X	X	✓	X	X	X	✓
	Estándar de archivos	X	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓
Reusability	Acceso a metadata	X	X	✓	X	X	X	✓	✓	✓
	Descripción de procesamiento de datos	X	X	✓	X	✓	X	✓	✓	✓
	Definición de incertidumbres	X	X	X	X	X	X	X	X	X

A partir de La Tabla 4 se puede observar que ninguna de las plataformas proporciona información sobre las posibles incertidumbres o errores de los datos suministrados. En cuanto a los atributos de acceso a metadatos y descripción de los procesamiento de datos utilizados, solo la mitad de las plataformas cumplen con estos requisitos, dificultando el proceso de análisis de resultados. Esto deriva en obstáculos para comprender cabalmente la naturaleza y representación de los datos, generando incertidumbre por la falta de claridad sobre los métodos de recolección de datos y su respectiva precisión o confiabilidad. Además, esto puede encubrir potenciales errores o anomalías presentes en los datos. La falta de metadatos no solo propicia inconsistencias en los métodos de uso y análisis de los datos por parte de distintos individuos, sino que también facilita la obtención de resultados engañosos al intentar comparar o integrar los datos con otras fuentes informativas.

Según el análisis realizado, se concluye que la plataforma más recomendada para la descarga de datos climáticos en Chile es CAMELS-CL, seguida por CR2MET y la plataforma de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Por otro lado, las plataformas con una evaluación menos favorable en términos de los principios FAIR son Meteovid, debido a la falta de acceso público, y la plataforma de la Dirección General de Aguas (DGA). Es relevante destacar que la DGA, a pesar de ser una fuente de datos para otras plataformas, muestra carencias en su propia accesibilidad y en la adhesión a los principios FAIR, al carecer de un procedimiento definido para la descarga de datos, así como de una estandarización de variables, unidades y periodos de interés.

4.1.2 Identificación de Variables Hidrológicas Esenciales

Antes de iniciar el proceso de búsqueda y descarga de los datos, se determinan las regiones en las que se centrará el estudio. Para esto se utiliza el listado de estaciones meteorológicas y pluviométricas proporcionado por la DGA (Tabla 5).

Tabla 5: Número de Estaciones por Región

Región	N° estaciones
Antofagasta	18
Arica y Parinacota	11
Atacama	14
Aysén	14
Coquimbo	12
Araucanía	14
Los Lagos	12
Los Ríos	5
Ñuble	6
Biobío	18
O'Higgins	8
del Maule	25
Metropolitana	19
Tarapacá	1
Valparaíso	17

Las regiones metropolitanas y del Maule son seleccionadas para ser consideradas en este proceso, ya que cuentan con la mayor cantidad de estaciones de monitoreo, considerando únicamente Chile continental.

La elección de enfocarse en estas regiones se fundamenta en el objetivo de obtener una representación adecuada de la máxima disponibilidad y densidad de datos accesibles en el país. Es importante destacar que, aunque se haya optado por una muestra geográfica más limitada, los resultados y conclusiones derivados de este enfoque pueden proporcionar información

valiosa sobre las tendencias de datos y sus implicaciones que trascienden las regiones estudiadas.

Las fuentes de descarga para cada una de las variables de interés (EHVs) se resumen en La Tabla 6.

Tabla 6: Disponibilidad de EHVs

EHVs	Base de Datos
Caudal	DGA
Precipitaciones	CR2MET
Evapotranspiración	CR2MET
	CAMELS-CL
Infiltración	--
Agua subterránea	--

A pesar de la disponibilidad de datos relativos a la evapotranspiración, estos no se incorporan al análisis debido a que estos no se enmarcan en el contexto de observaciones puntuales. Más bien, estos datos emergen como resultado de mediciones satelitales que se complementan con la aplicación de modelos de cálculo. Dicha característica metodológica, que involucra la integración de información proveniente de distintas fuentes y el empleo de modelos para su derivación, introduce una complejidad en la naturaleza de estos datos, lo que justifica su exclusión en el presente análisis enfocado en observaciones puntuales y directas de variables climáticas y pluviométricas.

Debido a lo anterior, sólo se continuará el análisis con las variables de precipitación y caudal, las cuales cuentan con registros de medición diaria acumulada y mensual acumulada. Aunque esta limitación no excluye la posibilidad de realizar un análisis, se debe tener en cuenta que la integridad del estudio sobre el caudal puede verse comprometida. Esto se debe a que una correlación del caudal requiere la disponibilidad de cuencas hidrográficas no intervenidas, donde el flujo de agua superficial no esté interrumpido por factores como extracción o almacenamiento de agua. En la región del Maule más del 50% de sus estaciones de monitoreo están ubicadas en áreas con represas, lo cual afecta la libre circulación del agua superficial. De la misma forma, en la región Metropolitana al menos tres estaciones se encuentran cerca de represas. En vista de la ausencia de información disponible sobre el nivel de extracción en los puntos de medición que abarca el estudio, no es posible corregir los datos de caudal, por lo cual existe incertidumbre en la interpretación de futuros resultados.

4.2 Estudio de Calidad de Base de Datos

Para este estudio, se recurrió a datos provenientes de diversos archivos, los cuales fueron seleccionados en función de la variable específica bajo análisis, así como su frecuencia de medición y unidades correspondientes. Esta estrategia fue empleada para asegurar la consistencia y relevancia de los datos utilizados en cada etapa del estudio. Los archivos considerados y sus atributos se resumen en La Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros y Archivos para el Estudio

Parámetro	Archivo	Resolución
Precipitación [mm]	precip_cr2met_mm_mon.csv	Mensual
Precipitación [mm]	precip_cr2met_mm_day.csv	Diaria
Caudal [mm]	q_mm_mon.csv	Mensual
Caudal [mm]	q_mm_day.csv	Diaria
Caudal [m3/s]	q_m3s_mon.csv	Mensual
Caudal [m3/s]	q_m3s_day.csv	Diaria

4.2.1 Completitud

Al hacer la evaluación de estaciones pertenecientes a la región Metropolitana y a la región del Maule se observa que existen estaciones listadas en el registro de la DGA que no aparecen en las bases de datos del CR2MET.

En el caso de la región Metropolitana de las 19 estaciones registradas en la DGA se encontraron 11 en la base de datos de CR2MET. De la misma forma, en la región del Maule existen 25 estaciones registradas en la base de datos de la DGA, de las cuales se encontraron 10 en CR2MET. Estas estaciones sin datos se representan con 100% de data faltante en La Ilustración 3.

Dejando de lado las estaciones no encontradas, se realiza el análisis de completitud descrito en la sección 3.2.1. A continuación, se presentan los resultados de dichos análisis, resumidos en las tablas 8 y 9, las cuales muestran el porcentaje de data faltante de cada región según cada archivo de base de datos.

Tabla 8: Análisis de Completitud de Caudal, Región Metropolitana

Estación	% q_day_m m	% q_mon_m m	% q_day_vo l	% q_mon_vo l	% pp_mm_day	% pp_mm_mo n
5702001	31,43	12,3	100	12,3	100	100
5706001	67,31	7,86	100	7,86	100	100
5710001	45,16	5,44	100	5,44	100	100
5716001	68,94	9,07	100	9,07	100	100
5720001	91,21	75,4	100	75,4	100	100
5721001	73,35	23,39	100	23,39	100	100
5722001	54,34	10,08	100	10,08	100	100
5730008	80,38	42,94	100	42,94	100	100
5746001	73,07	22,58	100	22,58	100	100
5748001	64,86	8,67	100	8,67	100	100

Tabla 9: Análisis de Completitud de Caudal, Región del Maule

Estación	% q_day_mm	% q_mon_mm	% q_day_vol	% q_mon_vol	% pp_mm_day	% pp_mm_mon
7104002	49,5	4,23	100	4,23	100	100
7303000	86,84	62,3	100	62,3	100	100
7306001	87,8	65,32	100	65,32	100	100
7320003	86,12	61,09	100	61,09	100	100
7321002	60,31	52,02	100	52,02	100	100
7330001	37,11	5,65	100	5,65	100	100
7350001	40,22	3,23	100	3,23	100	100
7355002	51,58	7,06	100	7,06	100	100
7359001	64,94	4,64	100	4,64	100	100
7383001	72,9	19,76	100	19,76	100	100

El análisis de completitud revela un significativo porcentaje de datos no disponibles (NA) en los registros, iniciando por los archivos de precipitación, que se encuentran sin datos útiles (100% NA) al igual que los archivos de caudal diario en unidad de volumen-tiempo. Por otro lado, los archivos de caudal diario en milímetros de altura supera el 30% de NA en todas las estaciones evaluadas. En la región Metropolitana se alcanza un máximo del 91%, mientras que la región del Maule alcanza un máximo de 87%. Este nivel de pérdida de datos puede considerarse significativo.

En contraste, los registros de caudal mensual presentan un porcentaje de datos faltantes menor. Esta diferencia se debe a la naturaleza de la medición, donde el valor mensual se

calcula como la suma acumulada de todos los días del mes y el mes se considera completo si posee menos de 5 días sin información en el caso de precipitación y caudal (Ximena Vargas M et al., 2017).

4.2.2 Redundancia

Al examinar el análisis de redundancia, como se sintetiza en La Tabla 10.

Tabla 10: Análisis de Redundancia de Caudal

Región	q_day_m m	q_mon_mm	q_day_vol	q_mon_vol	pp_mm_day	pp_mm_mon
Metropolitana	15222	8	0	8	0	0
Maule	14760	8	0	8	0	0

En los archivos de caudal diario, expresados en milímetros, se exhibe un alto grado de redundancia en términos de información entre las distintas estaciones, en comparación con los registros de caudal mensual que presentan únicamente ocho filas de datos repetidos. Por otro lado, se observa que los demás archivos carecen de redundancia, aunque este valor no es indicativo de una evaluación positiva de los datos, ya que se refiere a los archivos en los que los valores de datos eran un 100% NA (No Disponible).

Este análisis resalta la importancia de la redundancia en los datos de caudal diario, lo que sugiere la necesidad de una mayor revisión y posiblemente la aplicación de técnicas de filtrado para garantizar la fiabilidad y coherencia de los datos de caudal en esta resolución temporal.

Para abordar las limitaciones en cuando al alto porcentaje de data perdida y redundancia, se implementó una estrategia para relacionar los periodos de operación de las estaciones, considerando cada región por separado. Esto permite mejorar la integridad de los datos y optimizar el análisis de caudales, contribuyendo a obtener resultados más fiables y consistentes en la evaluación hidrológica. Los resultados de esto reflejan en las tablas 11 y 12.

Tabla 11: Comparación de Completitud por Periodos, Región Metropolitana

Estación	1979-2022		1991-2016		Diferencia	
	% q_day_m m	% q_mon_m m	% q_day_m m	% q_mon_v ol	% q_day_mm	% q_mon_vol
5702001	31,43	12,30	10,63	6,98	20,80	5,32
5706001	67,31	7,86	8,11	4,98	59,20	2,88
5710001	45,16	5,44	3,82	2,99	41,34	2,45
5716001	68,94	9,07	0,12	0,00	68,82	9,07
5720001	91,21	75,40	75,42	74,75	15,79	0,65
5721001	73,35	23,39	1,59	1,33	71,76	22,06
5722001	54,34	10,08	3,12	2,66	51,22	7,42
5730008	80,38	42,94	7,73	5,98	72,65	36,96
5746001	73,07	22,58	3,39	2,66	69,68	19,92
5748001	64,86	8,67	7,88	6,31	56,98	2,36
Redundancia	15222	8	0	0	15222	8,00000

Se observa que, en el caso de los datos de caudal diario, la presencia de valores no disponibles (NA) condujo a una disminución promedio del 53% en el caudal registrado. Por su parte, en los datos de caudal mensual, la disminución promedio fue del 11% debido a los valores NA. Además, al considerar el periodo de intercepción entre los registros de caudal diario y las operaciones de las estaciones, se logró eliminar por completo la redundancia en los datos.

Tabla 12: Comparación de Completitud por Periodos, Región del Maule

Estación	1979-2022		2002-2020		Diferencia	
	% q_day_mm	% q_mon_vol	% q_day_mm	% q_mon_vol	% q_day_mm	% q_mon_vol
7104002	49,5	4,23	4,30	5,99078341	45,20	-1,76
7303000	86,84	62,3	13,51	13,82488479	73,33	48,48
7306001	87,8	65,32	19,94	20,73732719	67,86	44,58
7320003	86,12	61,09	8,65	11,05990783	77,47	50,03
7321002	60,31	52,02	8,79	10,59907834	51,52	41,42
7330001	37,11	5,65	3,21	4,608294931	33,90	1,04
7350001	40,22	3,23	2,74	4,147465438	37,48	-0,92
7355002	51,58	7,06	9,55	10,13824885	42,03	-3,08
7359001	64,94	4,64	4,27	6,451612903	60,67	-1,81
7383001	72,9	19,76	4,35	5,529953917	68,55	14,23
Redundancia	14760	8	0,00	0	14.760,00	8

En el caso de la región del Maule, los datos de caudal diario tienen una disminución promedio del 56% de valores no disponibles (NA), mientras que, en los datos de caudal mensual, la disminución

promedio fue del 19%. Es importante señalar que, en algunas estaciones específicas, el porcentaje de datos perdidos aumentó, pero en ningún caso superó el 4%.

Por otro lado, al considerar el periodo de intercepción entre los registros de caudal diario y las operaciones de las estaciones, se logró eliminar por completo la redundancia en los datos. Este análisis resalta la necesidad de abordar la gestión de datos faltantes y la importancia de considerar el periodo de operación de las estaciones para garantizar la coherencia y confiabilidad de los datos de caudal en el estudio.

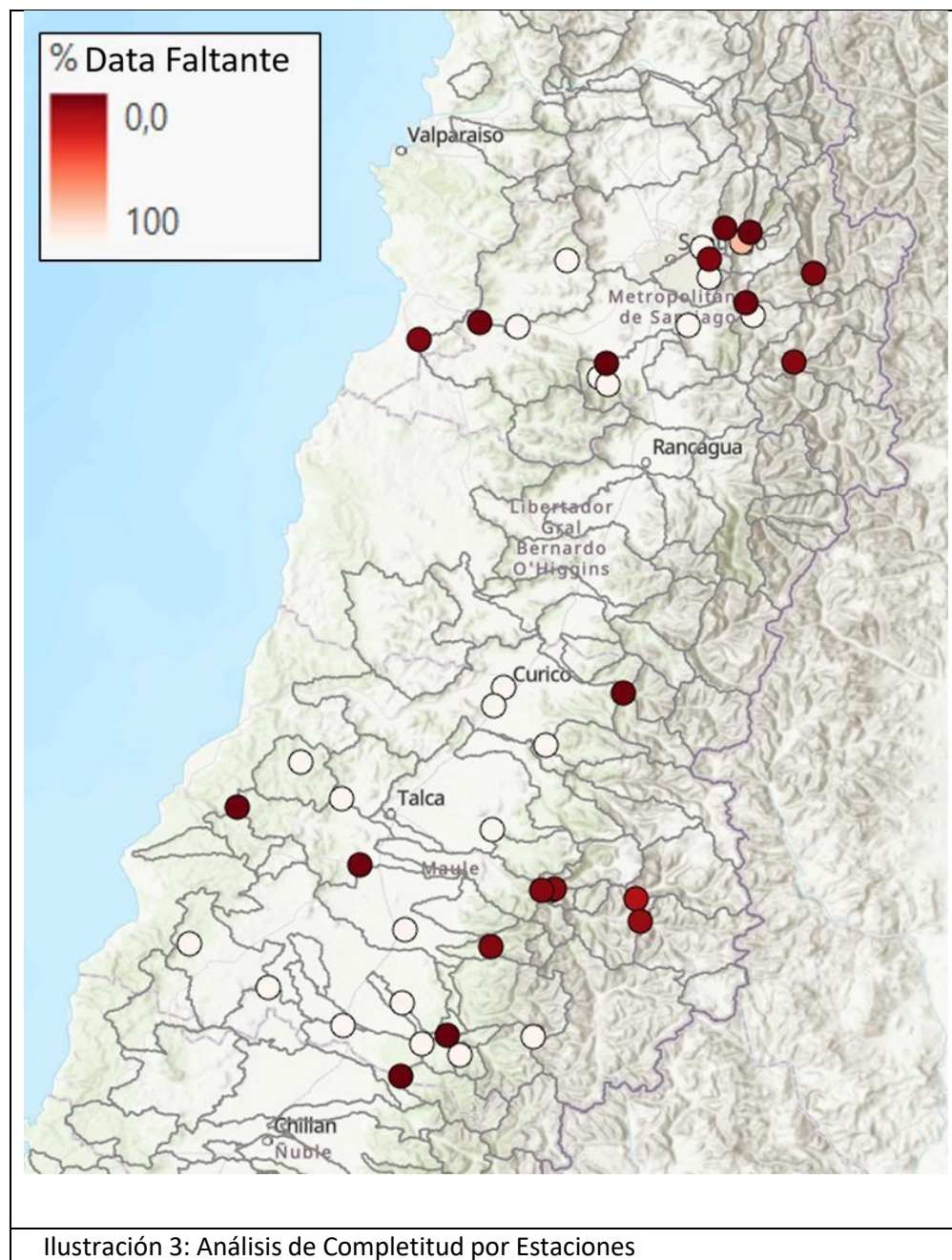
La disparidad en términos de porcentaje de datos faltantes entre los registros de caudal diario y mensual en cada región es inferior al 4%. Debido a esta diferencia, se opta por utilizar ambos conjuntos de datos en las fases subsiguientes del estudio, en las unidades de milímetros de altura. Es decir, se consideran los archivos de caudales diarios y los registros de caudales mensuales, expresados en milímetros de altura, para continuar con el análisis y modelamiento hidrológico.

A pesar de lograr una disminución en los valores de datos no disponibles al acotar el análisis a los periodos con mayores registros, esta reducción conlleva un acortamiento en los períodos de estudio. En la región Metropolitana, el período de estudio se reduce a 25 años, mientras que en la región del Maule se reduce a 18 años. Si bien en el contexto chileno, como referencia general, se recomienda contar con al menos 20 años de datos hidrológicos para obtener resultados sólidos y confiables (Wagener & Montanari, 2011), otros autores sugieren disponer de al menos 10 años de datos hidrológicos para obtener resultados confiables en contextos generalizados (Zounemat-Kermani et al., 2021). Dado que los nuevos periodos de medición son mayores a 10 años, se continua el estudio.

4.2.3 Esquema Procesos Hidrológicos en Rango Espacio-Temporal

4.2.4 Visualización de Datos

En La Ilustración 3, se exhibe la representación gráfica de la distribución espacial de las estaciones investigadas en las dos regiones en cuestión. Para facilitar la identificación de las estaciones con mayor volumen de datos, se genera un gradiente colorimétrico que refleja las estaciones con un registro más extenso, basado en los parámetros detallados en las tablas 11 y 12. Se agregan las estaciones sin registro de datos, considerándolas como estaciones con 100% de data faltante.



Se aprecia una distribución geográfica no homogénea entre las estaciones. En la región Metropolitana, la mayoría de las estaciones se encuentran ubicadas en el sector precordillerano, con sólo dos estaciones relativamente cercanas a la costa. Además, cuatro estaciones con registro de datos se encuentran en las inmediaciones de la comuna de Santiago, lo que podría sugerir una mayor densidad de monitoreo en esa área específica.

En relación a la región del Maule, se mantiene una tendencia similar, con más estaciones en el sector precordillerano y sólo una estación cercana a la costa. Sin

embargo, destaca una aglomeración de cinco estaciones con registro de datos distribuidas en sólo tres cuencas. Aunque esto podría sugerir una sobre representación de dichas cuencas, se debe tener en cuenta que las estaciones mencionadas tienen un alto porcentaje de datos no disponibles.

A diferencia de la Región Metropolitana, las estaciones sin registro de datos en la Región del Maule no se encuentran próximas a otras que sí poseen registros. De hecho, estas estaciones sin data abarcan cuencas de la región que actualmente no están siendo monitoreadas. Por ende, la ausencia de registro de datos podría afectar la viabilidad de llevar a cabo estudios hidrológicos en el área.

4.2.5 Análisis Estadístico

Utilizando los archivos de caudales diarios y los registros de caudales mensuales, se obtienen los datos estadísticos de promedio y desviación estándar (STD), mostrados en las ilustraciones 4 y 5. Dichos valores son detallados en el Anexo 1 del documento, sin embargo, un resumen de STD máximos y mínimos se presenta en La Tabla 13.

Tabla 13: Resumen Desviación Estándar

Región	Frecuencia Medición	Mínimo	Máximo
Metropolitana	Mensual	13.76	42.19
	Diario	0.52	2.02
Maule	Mensual	28.14	152.74
	Diario	1.26	9.64

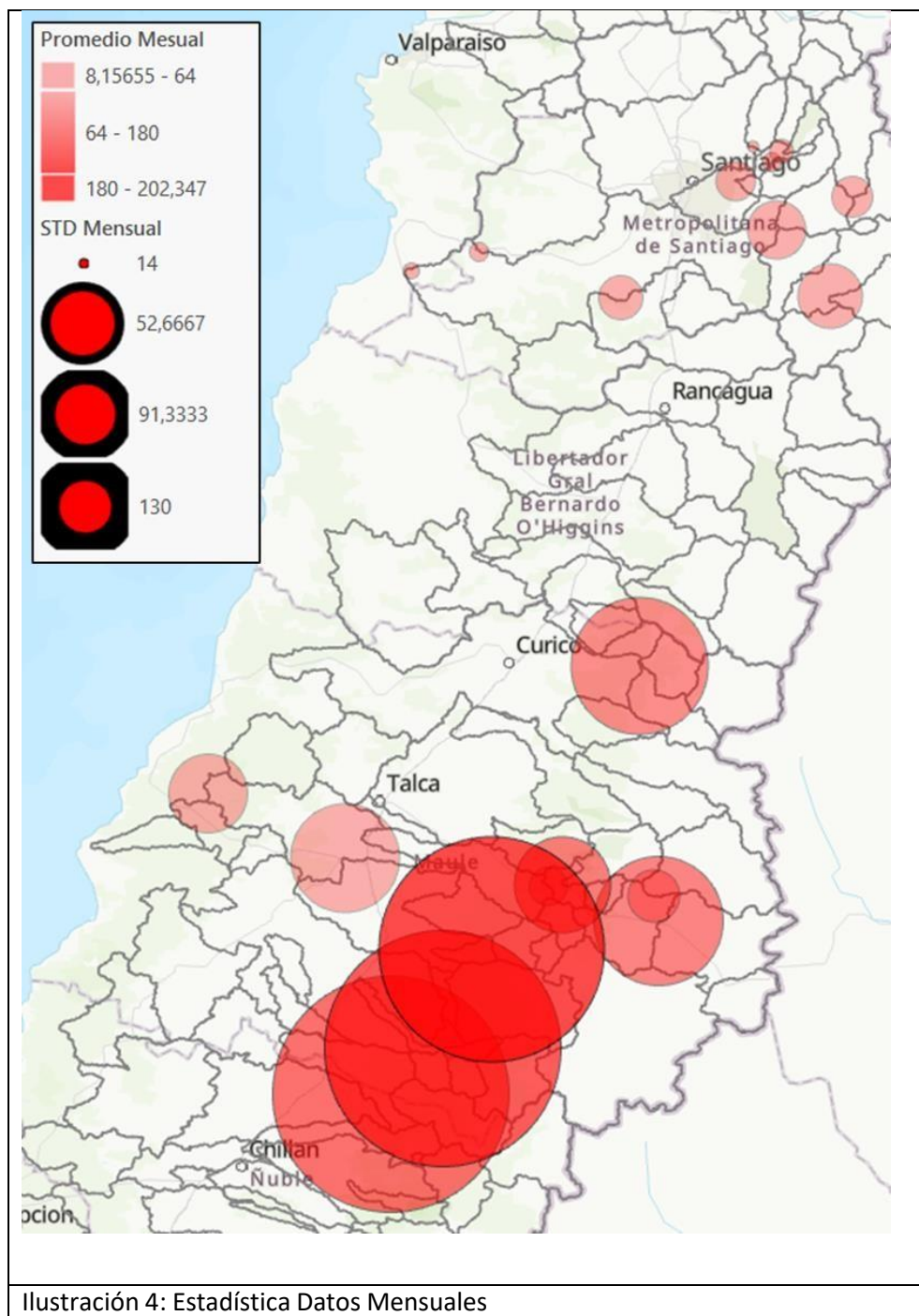
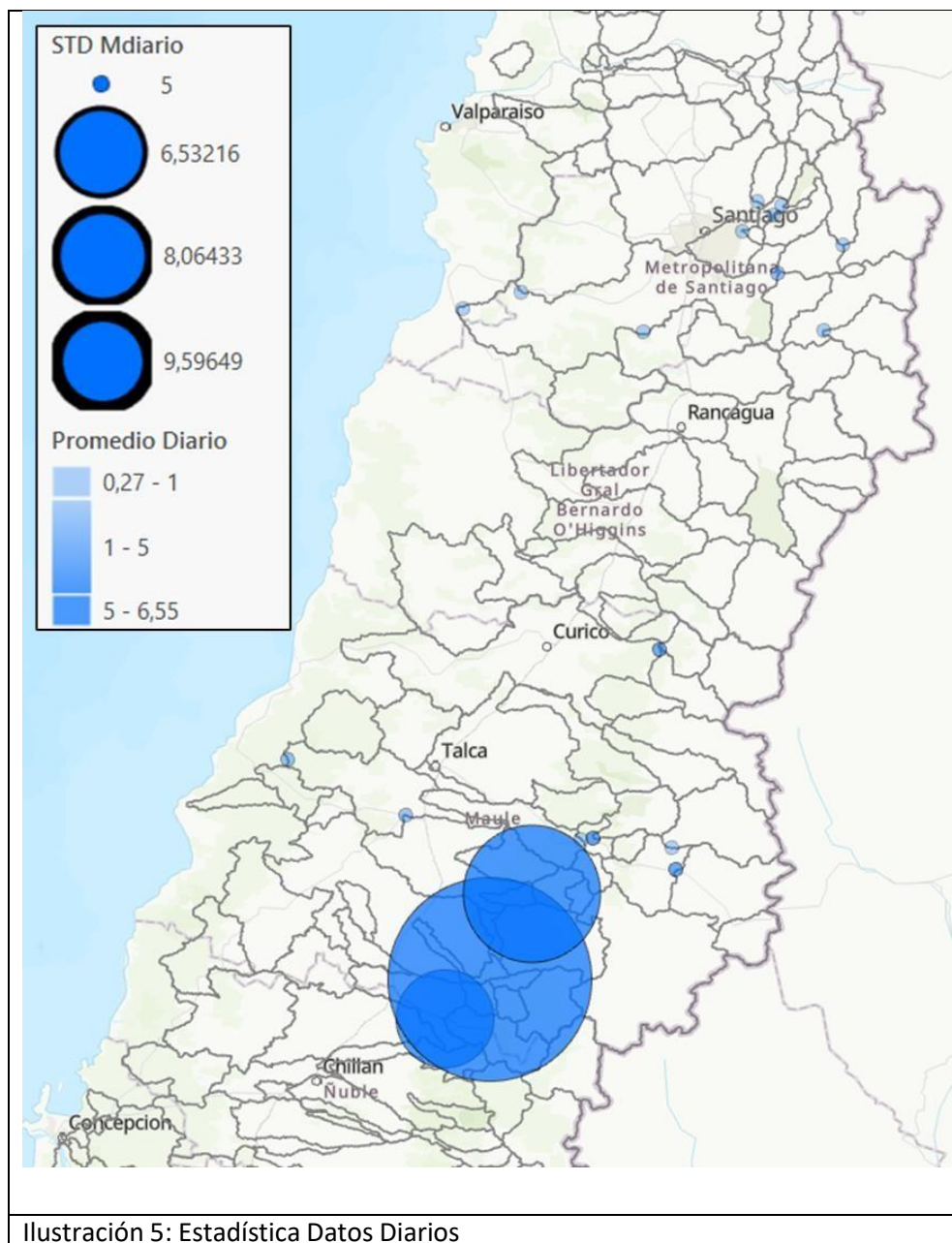


Ilustración 4: Estadística Datos Mensuales



Al comparar el comportamiento de los promedios y desviaciones estándar en ambas regiones, se observa que los promedios mensuales son significativamente más altos que los diarios, debido a la naturaleza de la medición, donde los promedios mensuales equivalen al acumulado de caudales diarios. La desviación estándar también es más alta en los datos mensuales, indicando una mayor variabilidad en los caudales a lo largo de un mes en comparación con los caudales diarios.

Por otro lado, al observar los promedios y desviaciones estándar entre las regiones, se advierten diferencias en los patrones de caudal. La Región del Maule tiende a presentar promedios de caudales más altos y con mayor variabilidad, tanto en los datos diarios como mensuales. Esta diferencia es particularmente significativa en las estaciones en la zona precordillerana sur de la región. Interpretar una desviación estándar elevada en el contexto de la escorrentía puede ofrecer información valiosa sobre la variabilidad y eficacia de los procesos de retención de sedimentos, así como sobre la distribución espacial de los coeficientes de escorrentía. Esta información sirve para evaluar la eficacia de las medidas de control de la erosión, comprender la dinámica del transporte de sedimentos y mejorar la precisión de los modelos hidrológicos. Sin embargo, como se menciona anteriormente, es posible que esta variabilidad en los datos esté relacionada a la intervención del flujo superficial, por lo cual no es posible precisar una explicación respecto a dicho comportamiento.

4.2.6 Tratamiento de Datos

Transformación logarítmica

Previo a la ejecución del análisis, se verifica la presencia de valores cero en los datos, dado que la cantidad de estos influye en la selección de una metodología que evite la indeterminación de la función logarítmica. Conforme a la metodología base, si existen pocos valores cero, estos pueden ser considerados como datos no disponibles. En cambio, de existir una cantidad significativa de datos ceros, estos se transforman a un valor mínimo para prevenir inconvenientes en los cálculos subsiguientes, optando, por ejemplo, por el valor 0,1. En La Tabla 13 se resume el conteo de ceros.

Tabla 14: Cantidad de Datos Cero en Bases de Datos

Serie	Cantidad de Ceros
RM Mensual	0
RM Diaria	0
Maule Mensual	0
Maule Diaria	1

Al aplicar la transformación logarítmica a la serie de caudales, se generan valores negativos en los datos transformados, como se detalla en los Anexos de la sección 2. Esta situación se origina debido a la existencia de valores de caudal extremadamente bajos en la serie original, los cuales, al ser sometidos a la transformación logarítmica, resultan en valores negativos.

Eliminación de tendencias

En segundo lugar, se procede a eliminar las tendencias estacionales presentes en los datos. El primer enfoque adoptado para abordar la eliminación de tendencias es el Análisis de Fluctuación Detrended (AFD), ampliamente utilizado para examinar la dependencia de largo alcance y las características fractales presentes en las series

temporales de datos. El núcleo del método implica la aplicación de una regresión lineal a la serie de datos transformada mediante la función logarítmica. Sin embargo, esta operación puede plantear desafíos desde el punto de vista computacional. Una vez realizada esta operación, se observa que las series vuelven a adquirir valores positivos. Para comprender más en detalle los resultados obtenidos a través de este procedimiento, se pueden consultar los gráficos correspondientes presentados en el Anexo 3.

Al proceder con los pasos subsiguientes de la metodología propuesta, correspondientes a la sustracción de promedios y división de desviación estándar, se encontró nuevamente la presencia de valores negativos en las series de caudal. Esta circunstancia tuvo un impacto en los resultados obtenidos en las etapas posteriores del análisis. Como medida para contrarrestar esta problemática y garantizar la integridad de los análisis subsiguientes, se tomó la decisión de utilizar los datos resultantes del segundo paso de la metodología para la continuación del análisis. De esta manera, se busca asegurar que los resultados posteriores se basen en datos confiables y coherentes, evitando la influencia disruptiva de los valores negativos que se observaron.

4.2.7 Variogramas

Los variogramas temporales, derivados a partir de la ecuación 2, se presentan en las ilustraciones 6, 7, 8 y 9.

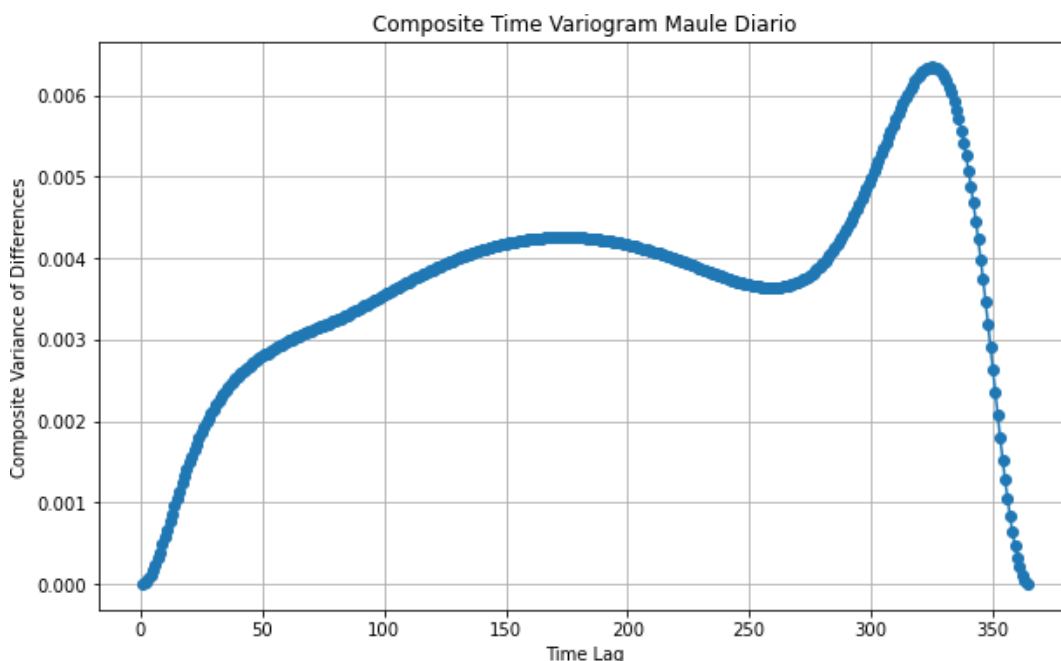


Ilustración 6: Variograma Temporal Maule (días)

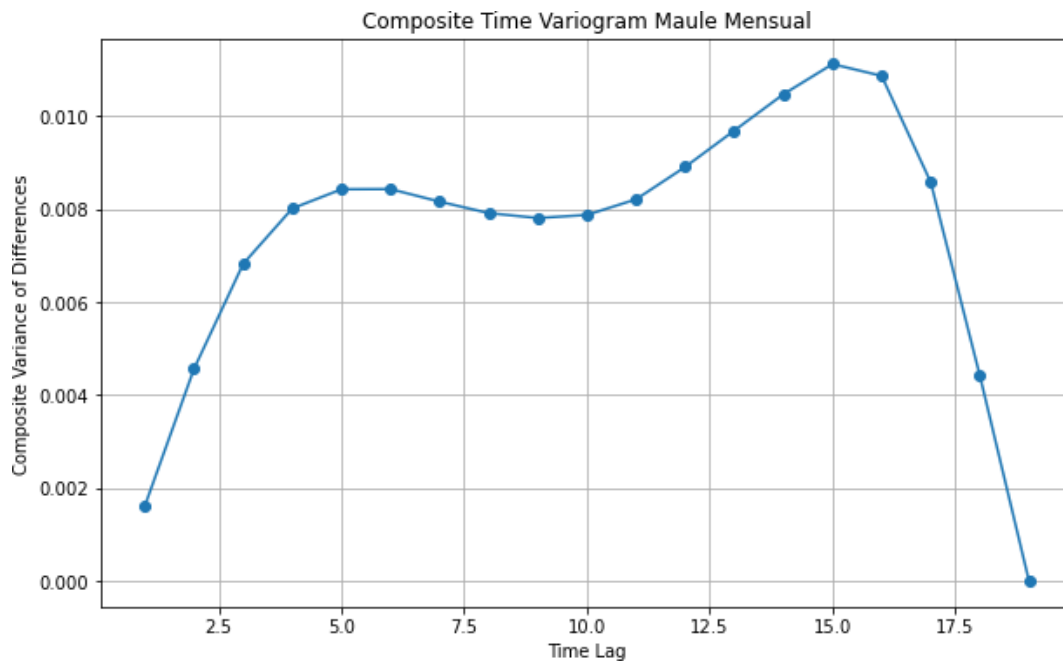


Ilustración 7: Variograma Temporal Maule (meses)

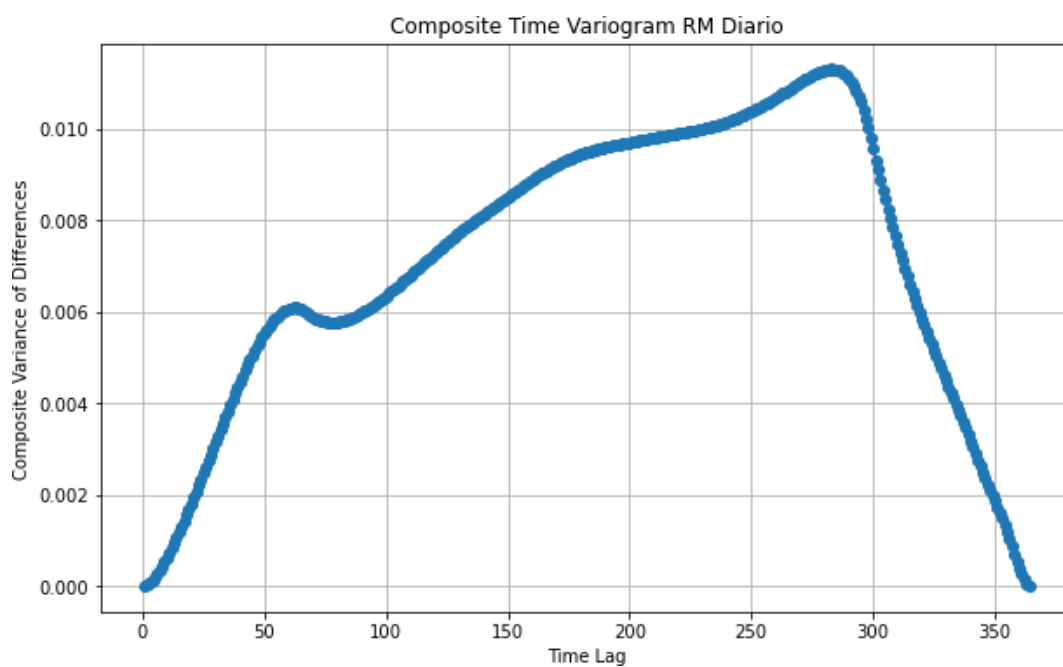


Ilustración 8: Variograma Temporal Metropolitana (días)

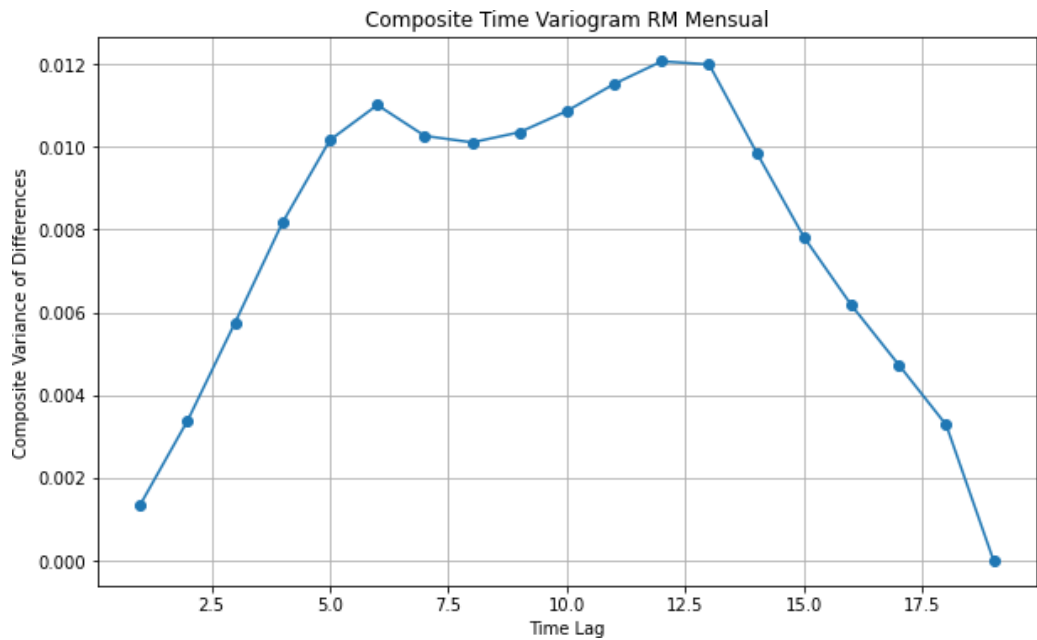


Ilustración 9: Variograma Temporal Metropolitana (meses)

De la misma forma, los variogramas espaciales, derivados a partir de la ecuación 3, se presentan en las ilustraciones 10, 11, 12 y 13.

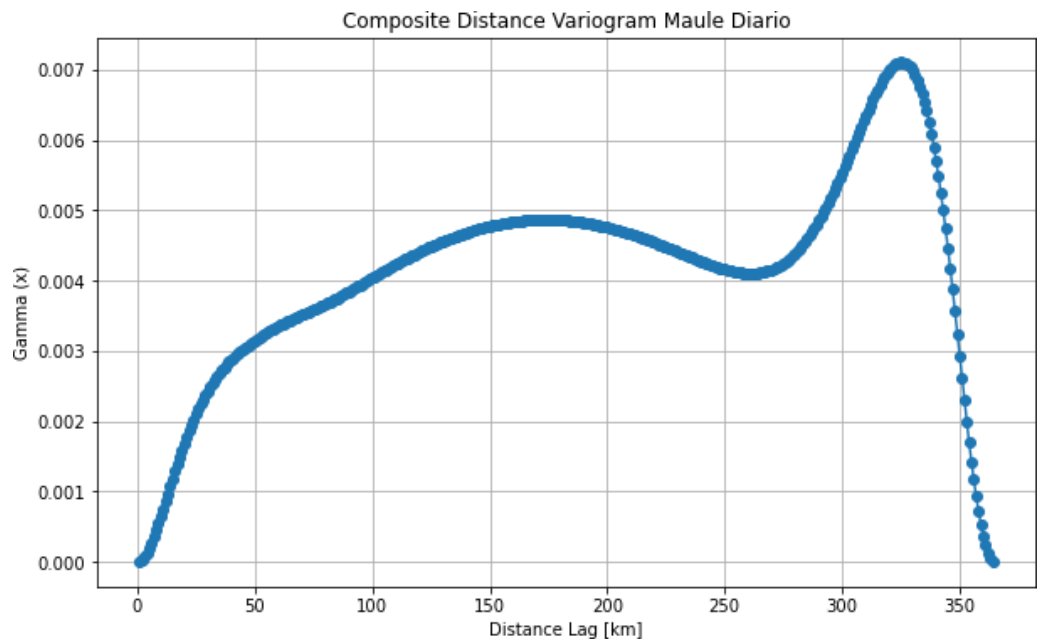


Ilustración 10: Variograma Espacial Maule (días)

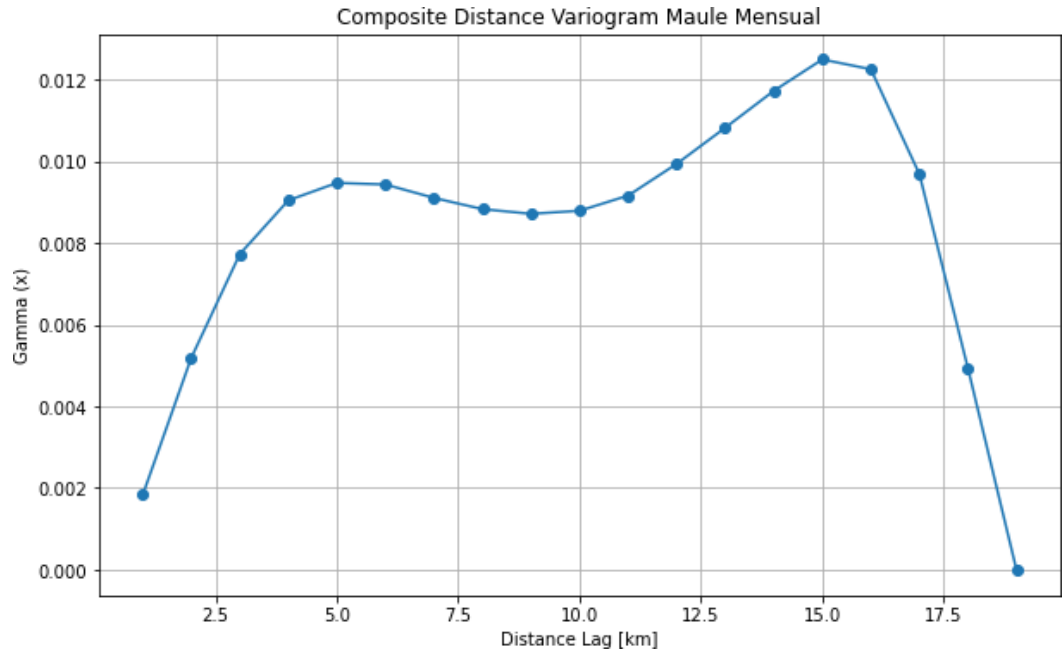


Ilustración 11: Variograma Espacial Maule (meses)

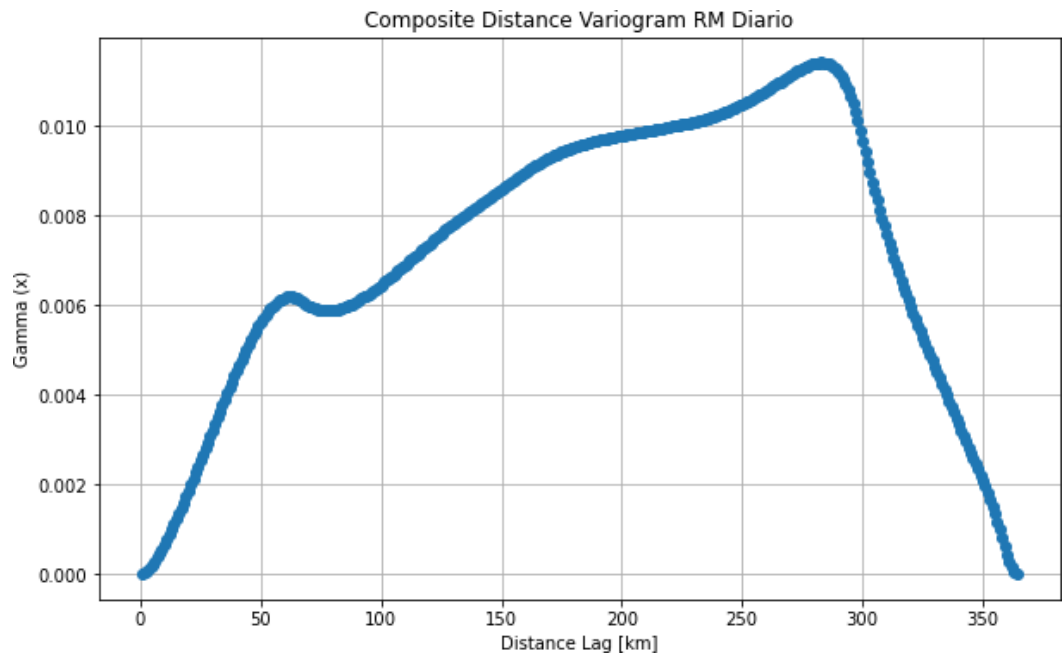


Ilustración 12: Variograma Espacial Metropolitana (días)

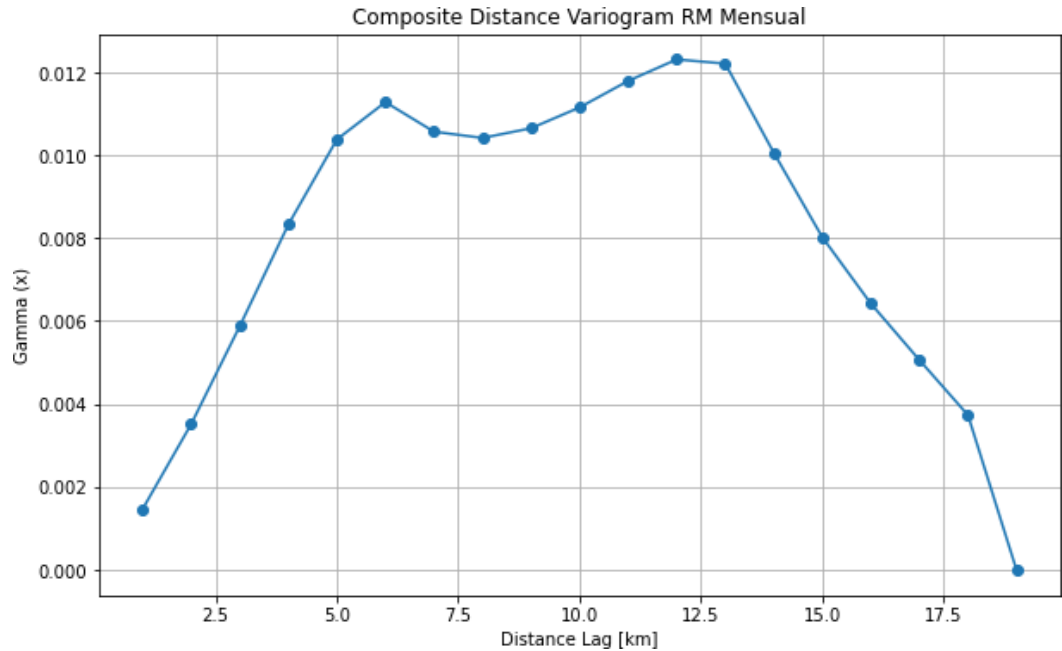


Ilustración 13: Variograma Espacial Metropolitana (meses)

Las ilustraciones anteriores revelan ciertas características compartidas entre los variogramas de mediciones diarias. Una de estas características es que todas las curvas tienen un punto de inicio cercano a 0 en el eje X. Esto indica que la variabilidad es generalmente baja cuando el desfase temporal es pequeño, lo que sugiere que las observaciones tomadas en momentos cercanos en el tiempo y en distancias cortas tienden a ser similares. Esto contrasta con la situación de las mediciones mensuales, donde se evidencia un nugget ($\text{Gamma}(x = 0)$) cercano a 0,002 tanto en el estudio temporal como en el espacial. Este fenómeno tiene diferentes interpretaciones, uno de ellos es error de medición, lo cual no podría ser verificado dado la falta de información referente a las características técnicas de medición. Otra posibilidad es que la escorrentía varía a escalas más pequeñas que la resolución de medición. Es decir, si hay mucha variabilidad a distancias y tiempos muy pequeños que no están siendo capturadas por las mediciones.

A medida que aumenta el desfase temporal y espacial, se observa un incremento en la variabilidad entre las observaciones. Esto indica que las mediciones tomadas en momentos y lugares más distantes en el tiempo y en el espacio tienden a diferir más entre sí. Similarmente, cuando el desfase disminuye, la variabilidad entre las mediciones también tiende a incrementar.

En todos los variogramas, se observa un decaimiento en la curva después de una meseta, lo cual es un comportamiento inusual que puede tener diversas interpretaciones. Una posibilidad es que indique una tendencia o deriva en los datos. Esto implicaría que existe una variación sistemática de la variable, ya sea en el espacio o en el tiempo, que no ha sido ni explicada ni eliminada. Otra interpretación posible es que la variable en estudio presenta dependencia espacial o temporal a lo largo de grandes distancias o periodos de tiempo. Bajo esta perspectiva, sería necesario analizar una mayor área de estudio o un periodo de tiempo más extenso. Sin embargo, esta última opción podría no ser viable, dado que el periodo de estudio inicial ya presenta porcentajes de data faltante elevados. Un tercer enfoque sugiere que la variable podría estar siendo influenciada por fenómenos que operan a una escala mayor que las distancias o los tiempos de retardo considerados, los cuales no han sido capturados en el variograma. En otras palabras, las mediciones de caudal podrían estar siendo influenciadas por factores no naturales o intervenciones en las cuencas hidrográficas, tal como se mencionó anteriormente.

Finalmente, se obtienen los esquemas de procesos hidrológicos en resolución espacio-temporal característico para cada serie de datos. Los resultados se muestran en las siguientes ilustraciones 14 y 15, mientras que la sobreposición de estos resultados con el esquema de Bloßchl and Sivapalan (1995) se muestra en La Ilustración 16.

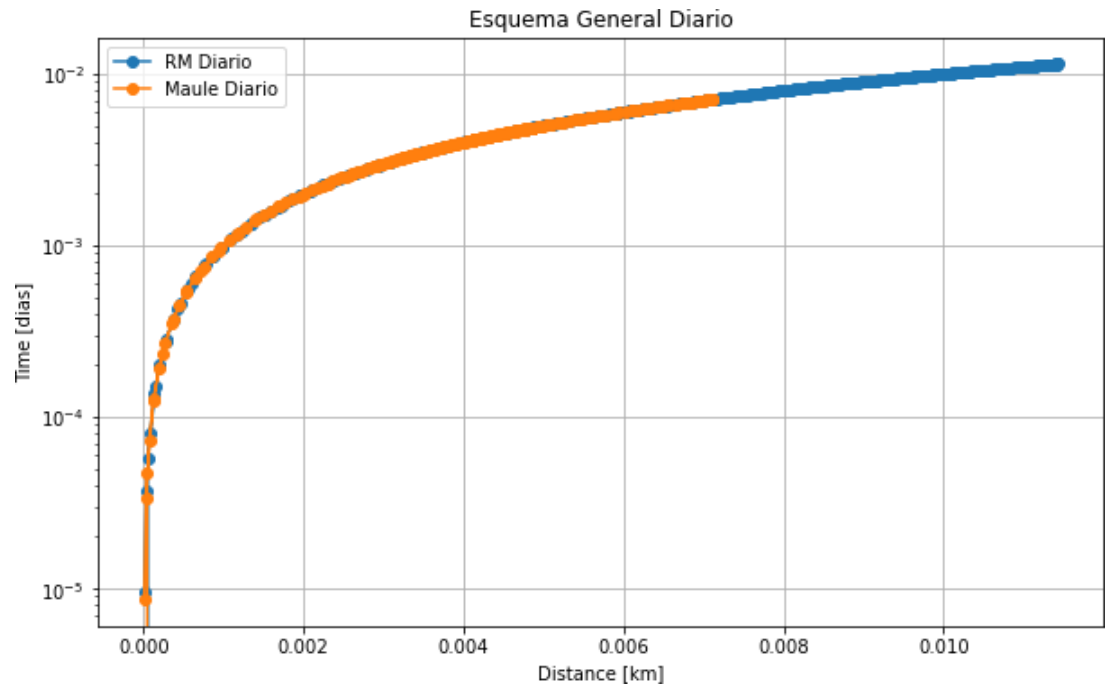


Ilustración 14: Esquema Proceso Hidrológico Diario

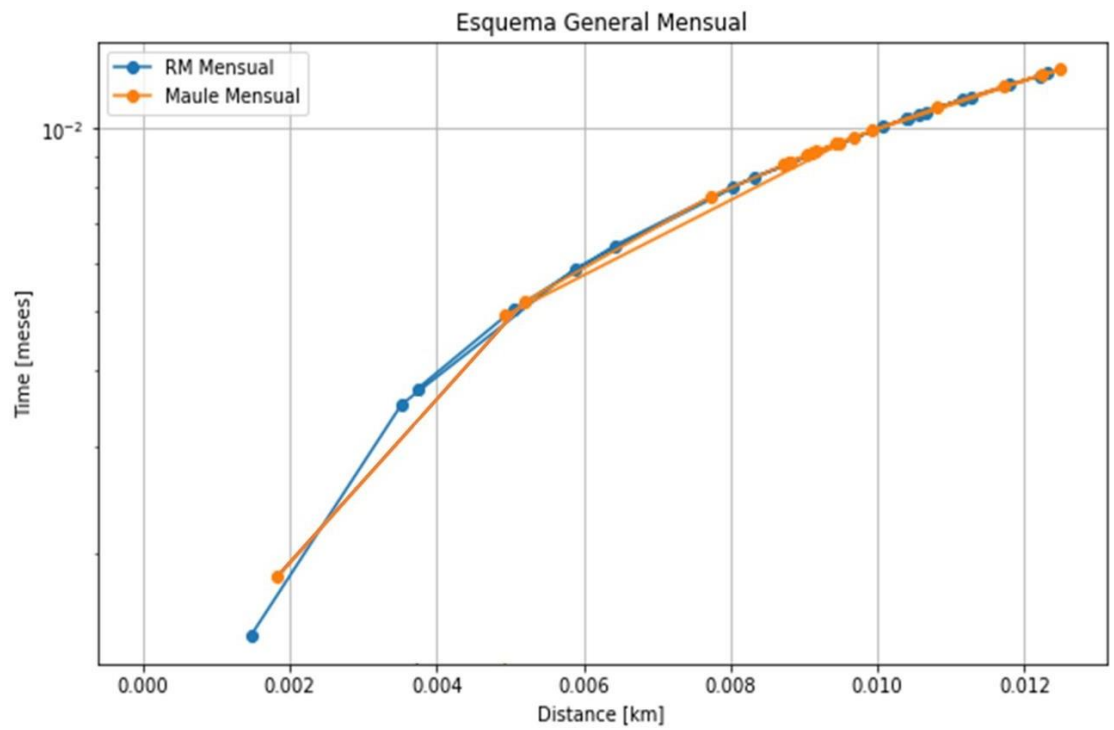


Ilustración 15: Esquema Proceso Hidrológico Mensual

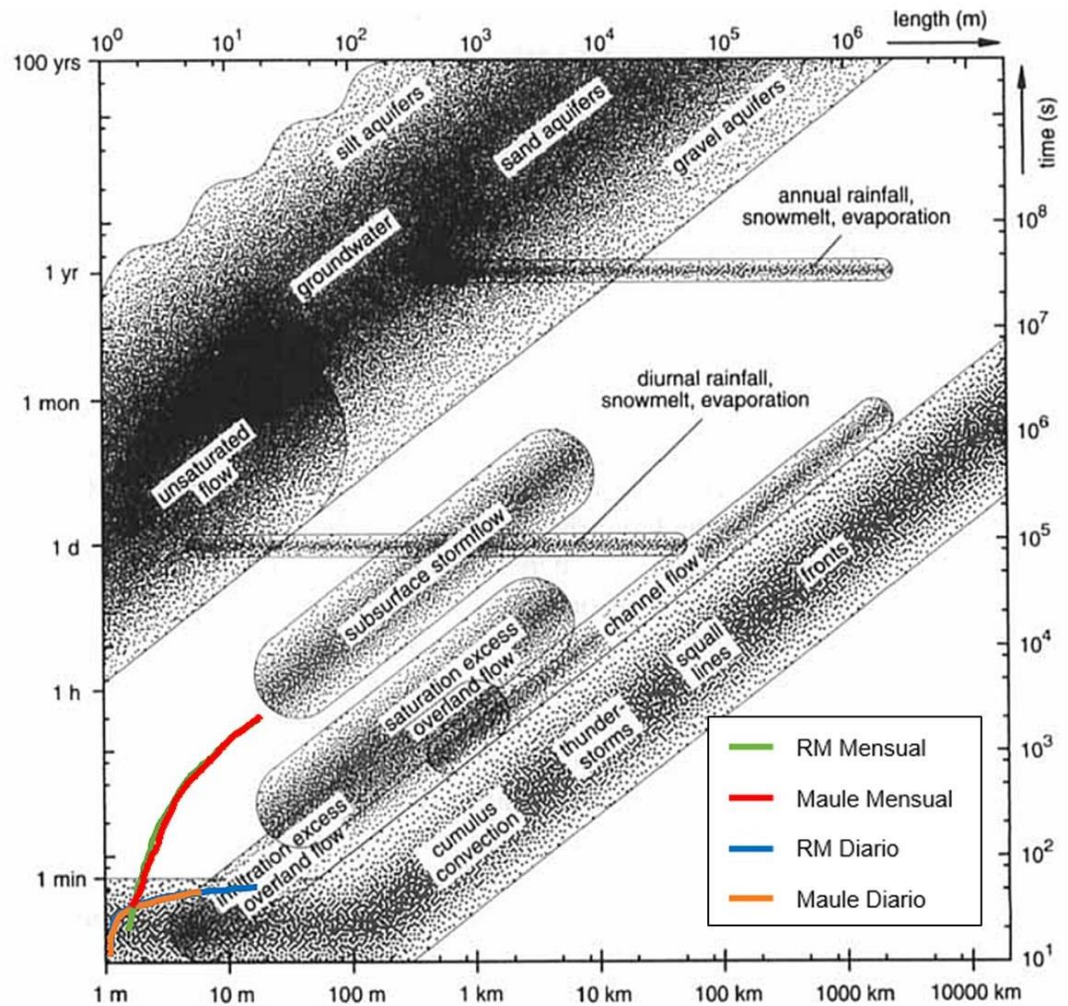


Ilustración 16: Esquema Proceso Hidrológico Espacio-Temporal

A pesar del comportamiento de los variogramas, se evidencia una marcada correlación hidrológica espacio-temporal en todos los esquemas, lo cual se mantiene consistente en ambas regiones, independientemente de la frecuencia de medición de los datos. Al analizar los esquemas correspondientes a mediciones mensuales, se destaca que el rango máximo de correlación es de aproximadamente 12 metros en distancia y 0.72 horas en tiempo. Esto implica que las mediciones hidrológicas presentan una correlación tanto en el ámbito espacial como temporal durante un período menor a una hora y en una distancia de alrededor de 12 metros.

De forma similar, los datos diarios muestran una resolución máxima a los 12 metros de distancia y 2,88 minutos.

Los rangos de estimación propuestos por Bloschl y Sivapalan (1995) se refieren a la escala en la cual ocurren los procesos físicos que gobiernan la generación de escorrentía. De acuerdo a esto, la sección “Infiltration excess overland Flow”, se refiere al flujo de agua superficial que ocurre cuando la tasa de infiltración del suelo es menor que la tasa de precipitación. En este caso, el agua no puede infiltrarse en el suelo y se acumula en la superficie, generando escorrentía sobre la superficie del suelo durante las precipitaciones. Dado a que parte de las curvas correspondientes a los datos diarios de ambas regiones entran en dicha categoría, es posible inferir que se podría llegar a modelar el caudal de forma hiper-local utilizando las observaciones puntuales disponibles cuando los suelos de los puntos de medición tengan una tasa de infiltración menor que la tasa de precipitación.

Lo anterior, considerando la incertidumbre de los datos disponibles en cuanto al nivel de intervención en el flujo monitoreado.

5 Conclusiones

Actualmente no es viable llevar a cabo modelos hidrológicos hiper-local en Chile. Considerando modelos hidrológicos completos, que involucren todas las variables esenciales. Esta conclusión se encuentra respaldada por una serie de razones de gran relevancia. En primer lugar, no existe monitoreo in situ para variables hidrológicas esenciales como infiltración, aguas subterráneas y evapotranspiración, limitando en gran medida la comprensión los flujos y movimientos del agua en las cuencas del país. Adicionalmente, a pesar de contar con registros de observaciones puntuales de precipitación, estos a menudo carecen de información completa y de calidad para realizar un modelamiento.

A pesar de las limitaciones y desafíos identificados en este análisis, existe la posibilidad de desarrollar modelos hidrológicos hiper-local de caudal en Chile, siempre y cuando se trate de flujo superficial por exceso de infiltración y se disponga de información detallada sobre el nivel de intervención en la cuenca. La clave para avanzar en esta dirección radica en la capacidad de cuantificar adecuadamente la incertidumbre asociada a los datos disponibles, particularmente en lo que respecta al grado de intervención en el flujo monitoreado.

Esta perspectiva abre la puerta a la realización de estudios más específicos y detallados en áreas concretas del país, donde se pueda abordar de manera más precisa la modelación hidrológica hiper-local. Sin embargo, es esencial abordar estas investigaciones con una comprensión clara de las limitaciones y desafíos relacionados con la calidad y disponibilidad de los datos, lo que permitirá obtener resultados más confiables y significativos.

Bibliografía

- Aerts, J. P. M., Hut, R. W., Giesen, N. C. Van De, Drost, N., Verseveld, W. J. Van, Weerts, A. H., & Hazenberg, P. (2021). *Large-sample assessment of spatial scaling effects of the distributed wflow_sbm hydrological model shows that finer spatial resolution does not necessarily lead to better streamflow estimates*. December, 1–28. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-605>
- Aerts, J. P. M., Hut, R. W., Van De Giesen, N. C., Drost, N., Van Verseveld, W. J., Weerts, A. H., & Hazenberg, P. (2022). Large-sample assessment of varying spatial resolution on the streamflow estimates of the wflow_sbm hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(16), 4407–4430. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4407-2022>
- Bai, P., Liu, X., Yang, T., Li, F., Liang, K., Hu, S., & Liu, C. (2016). Assessment of the influences of different potential evapotranspiration inputs on the performance of monthly hydrological models under different climatic conditions. *Journal of Hydrometeorology*, 17(8), 2259–2274. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0202.1>
- Beven, K. J., & Cloke, H. L. (2012). Comment on “hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water” by Eric F. Wood et al. In *Water Resources Research* (Vol. 48, Issue 1). <https://doi.org/10.1029/2010WR010090>
- Bierkens, M. F. P. (2015). Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resources Research*, 51(7), 4923–4947. <https://doi.org/10.1002/2015WR017173>
- Bierkens, M. F. P., Bell, V. A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L. E., David, C. H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J. S., Flörke, M., Gochis, D. J., Houser, P., Hut, R., Keune, J., Kollet, S., Maxwell, R. M., Reager, J. T., Samaniego, L., ... Wood, E. F. (2015). Hyper-resolution global hydrological modelling: What is next?: “Everywhere and locally relevant” M. F. P. Bierkens et al. Invited Commentary. *Hydrological Processes*, 29(2), 310–320. <https://doi.org/10.1002/hyp.10391>
- Bloschl, G., & Sivapalan, M. (1995). SCALE ISSUES I N HYDROLOGICAL MODELLING: A REVIEW. In *HYDROLOGICAL PROCESSES* (Vol. 9).
- Boeckhout, M., Zielhuis, G. A., & Bredenoord, A. L. (2018). The FAIR guiding principles for data stewardship: Fair enough? *European Journal of Human Genetics*, 26(7), 931–936. <https://doi.org/10.1038/s41431-018-0160-0>
- Chandra Rupa, R., & Mujumdar, P. P. (2019). Hydrologic impacts of climate change: Quantification of uncertainties. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 85(1), 77–94. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2018/49506>
- Clark, M. P., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1029/2010WR009827>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., López, F., & Villacis, M. (2020). Climatological and Hydrological Observations for the South American Andes: In situ Stations, Satellite, and Reanalysis Data Sets. *Frontiers in Earth Science*, 8(April), 1–20.

<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>

- de Graaf, I. E. M., van Beek, R. L. P. H., Gleeson, T., Moosdorf, N., Schmitz, O., Sutanudjaja, E. H., & Bierkens, M. F. P. (2017). A global-scale two-layer transient groundwater model: Development and application to groundwater depletion. *Advances in Water Resources*, 102, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.01.011>
- de Souza, S. A., & Reis, D. S. (2022). Trend Detection in Annual Streamflow Extremes in Brazil. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/w14111805>
- Eagleson, P. (1978). Introduction to Water Balance Dynamics. *Water Resources Research*, 14(5), 705–712.
- Gerlak, A. K., House-Peters, L., Varady, R. G., Albrecht, T., Zúñiga-Terán, A., de Grenade, R. R., Cook, C., & Scott, C. A. (2018). Water security: A review of place-based research. *Environmental Science and Policy*, 82, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.009>
- Giuliani, G., Egger, E., Italiano, J., Poussin, C., Richard, J. P., & Chatenoux, B. (2020). Essential variables for environmental monitoring: What are the possible contributions of earth observation data cubes? *Data*, 5(4), 1–25. <https://doi.org/10.3390/data5040100>
- Hoch, J. M., Sutanudjaja, E. H., Wanders, N., van Beek, R. L. P. H., & Bierkens, M. F. P. (2023). Hyper-resolution PCR-GLOBWB: opportunities and challenges from refining model spatial resolution to 1 km over the European continent. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(6), 1383–1401. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1383-2023>
- Holtzlag, A. A. M., Svensson, G., Baas, P., Basu, S., Beare, B., Beljaars, A. C. M., Bosveld, F. C., Cuxart, J., Lindvall, J., Steeneveld, G. J., Tjernström, M., & Van De Wiel, B. J. H. (2013). Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: Challenges for weather and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(11), 1691–1706. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00187.1>
- Kaspar, F., Lehner, B., & Döll, P. (2003). A global hydrological model for deriving water availability indicators: Model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 270(1–2), 105–134. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Kollet, S. J., Maxwell, R. M., Woodward, C. S., Smith, S., Vanderborght, J., Vereecken, H., & Simmer, C. (2010). Proof of concept of regional scale hydrologic simulations at hydrologic resolution utilizing massively parallel computer resources. *Water Resources Research*, 46(4). <https://doi.org/10.1029/2009WR008730>
- Krakauer, N. Y., Li, H., & Fan, Y. (2014). Groundwater flow across spatial scales: Importance for climate modeling. *Environmental Research Letters*, 9(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034003>
- Kumar, P., Avtar, R., Dasgupta, R., Johnson, B. A., Mukherjee, A., Ahsan, M. N., Nguyen, D. C. H., Nguyen, H. Q., Shaw, R., & Mishra, B. K. (2020). Socio-hydrology: A key approach for adaptation to water scarcity and achieving human well-being in large riverine islands. *Progress in Disaster Science*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100134>
- Kumari, N., & Srivastava, A. (2020). An Approach for Estimation of Evapotranspiration by Standardizing Parsimonious Method. *Agricultural Research*, 9(3), 301–309. <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00441-7>
- Lilhare, R., Pokorny, S., Déry, S. J., Stadnyk, T. A., & Koenig, K. A. (2020). Sensitivity analysis and

- uncertainty assessment in water budgets simulated by the variable infiltration capacity model for Canadian subarctic watersheds. *Hydrological Processes*, 34(9), 2057–2075. <https://doi.org/10.1002/hyp.13711>
- Lim, M. M. L., Sjøgaard Jørgensen, P., & Wyborn, C. A. (2018). Reframing the sustainable development goals to achieve sustainable development in the anthropocene—a systems approach. *Ecology and Society*, 23(3). <https://doi.org/10.5751/ES-10182-230322>
- Maxwell, R. M. (2013). A terrain-following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling. *Advances in Water Resources*, 53, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.10.001>
- McMillan, H. K., Westerberg, I. K., & Krueger, T. (2018). Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), 1–14. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1319>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Müller Schmied, H., Caceres, D., Eisner, S., Flörke, M., Herbert, C., Niemann, C., Asali Peiris, T., Popat, E., Theodor Portmann, F., Reinecke, R., Schumacher, M., Shadkam, S., Telteu, C. E., Trautmann, T., & Döll, P. (2021). The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: Model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, 14(2), 1037–1079. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021>
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116(D12), D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- O’neill, M. M. F., Tijerina, D. T., Condon, L. E., & Maxwell, R. M. (2021). Assessment of the ParFlow-CLM CONUS 1.0 integrated hydrologic model: evaluation of hyper-resolution water balance components across the contiguous United States. *Geoscientific Model Development*, 14(12), 7223–7254. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-7223-2021>
- Ortega Ana, & Treminio, J. (2022). A REVIEW OF THE WEAP 21 AND SWAT MODEL FOR WATER RESOURCES PLANNING. 29–44.
- Rahman, K. U., Shang, S., Shahid, M., & Wen, Y. (2019). Performance assessment of SM2RAIN-CCI and SM2RAIN-ASCAT precipitation products over Pakistan. *Remote Sensing*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/rs11172040>
- Shen, Y., Liu, D., Jiang, L., Tøttrup, C., Druce, D., Yin, J., Nielsen, K., Bauer-gottwein, P., Wang, J., & Zhao, X. (2022). Estimating Reservoir Release Using Multi-Source Satellite Datasets and Hydrological Modeling Techniques. *Remote Sensing*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/rs14040815>
- Van Beek, L. P. H., Wada, Y., & Bierkens, M. F. P. (2011). Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research*, 47(7). <https://doi.org/10.1029/2010WR009791>
- Van Beek, R., Hoch, J., Sutanudjaja, E., Wanders, N., & Bierkens, M. (2023). *Hyper-resolution*

hydrological modelling over Europe: results and emerging challenges. 23–5190.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-5190>

Wagener, T., & Montanari, A. (2011). Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *Water Resources Research*, 47(6), 1–8.
<https://doi.org/10.1029/2010WR009469>

Ximena Vargas M, A. E., McPHEE, J. T., Vicuña, S., Suarez, F., Meza, F., Daniele, L., Rondanelli, R., Lagos, M. Z., Mendoza, P., Bambach, N., Pablo Boisier, J., & Cepeda, J. A. (2017). *Balance Hídrico Chile Metodología Y Desafíos De Modelación.*

Ximena Vargas Mesa. (2022). *Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile.*

Zounemat-Kermani, M., Batelaan, O., Fadaee, M., & Hinkelmann, R. (2021). Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 598(March), 126266.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126266>

Anexo

1 Anexo 1: Análisis Estadístico

Utilizando los archivos de caudales diarios, expresados en milímetros de altura, y los registros de caudales mensuales, medidos en volumen por unidad de tiempo (m^3/s), se tienen los siguientes datos estadísticos.

Tabla 15: Estadística Datos Mensuales Región Metropolitana

Estaciones	Promedio	Desviación Estándar
5702001	34,92	42,19
5706001	16,27	29,87
5710001	59,01	39,05
5716001	36,29	31,50
5720001	19,05	18,27
5721001	22,73	20,76
5722001	16,51	13,76
5730008	17,54	29,00
5746001	23,36	18,48
5748001	20,95	16,83

Tabla 16: Estadística Datos Diarios Región Metropolitana

Estaciones	Promedio	Desviación Estándar
5702001	1,15	1,47
5706001	0,54	1,10
5710001	1,94	1,38
5716001	1,20	2,02
5720001	0,62	1,26
5721001	0,75	0,73
5722001	0,54	0,52
5722002	0,74	0,86
5730008	0,56	1,30
5746001	0,77	1,09
5748001	0,69	0,78

Tabla 17: Estadística Datos Mensuales Región del Maule

Estaciones	Promedio	Desviación Estándar
7104002	103,14	78,86
7303000	112,26	74,77
7306001	8,16	35,84
7320003	120,78	58,27
7321002	14,92	28,14
7330001	137,27	143,35
7350001	159,91	152,74
7355002	202,35	124,38
7359001	55,10	64,84
7383001	58,82	49,01

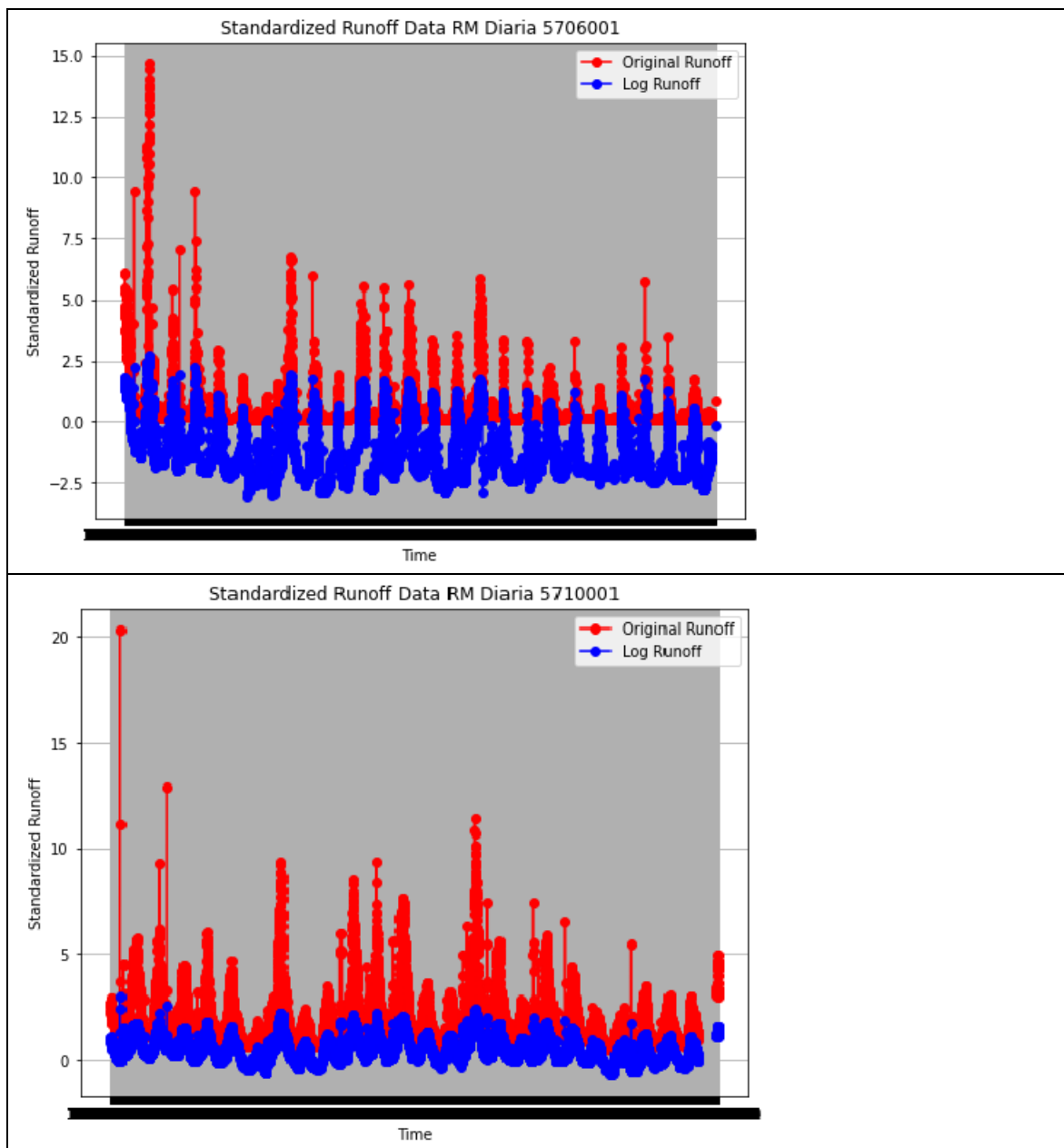
Tabla 18: Estadística Datos Diarios Región del Maule

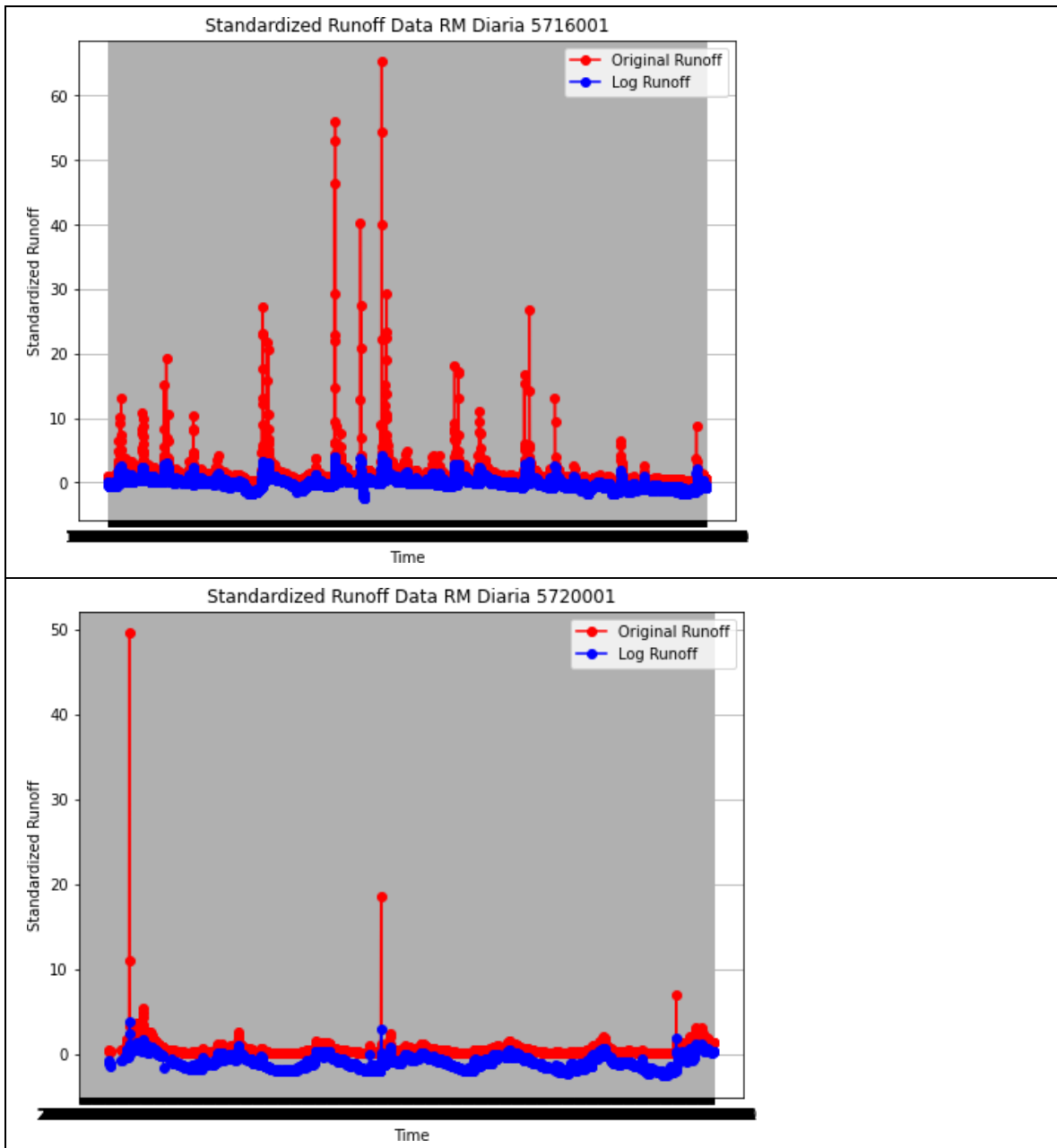
Estaciones	Promedio	Desviación Estándar
7104002	3,33	3,47
7303000	3,63	2,82
7306001	0,27	1,26
7320003	3,95	2,52
7321002	0,47	1,52
7330001	4,43	7,04
7350001	5,23	9,64
7355002	6,55	8,00
7359001	1,77	3,15
7383001	1,91	2,49

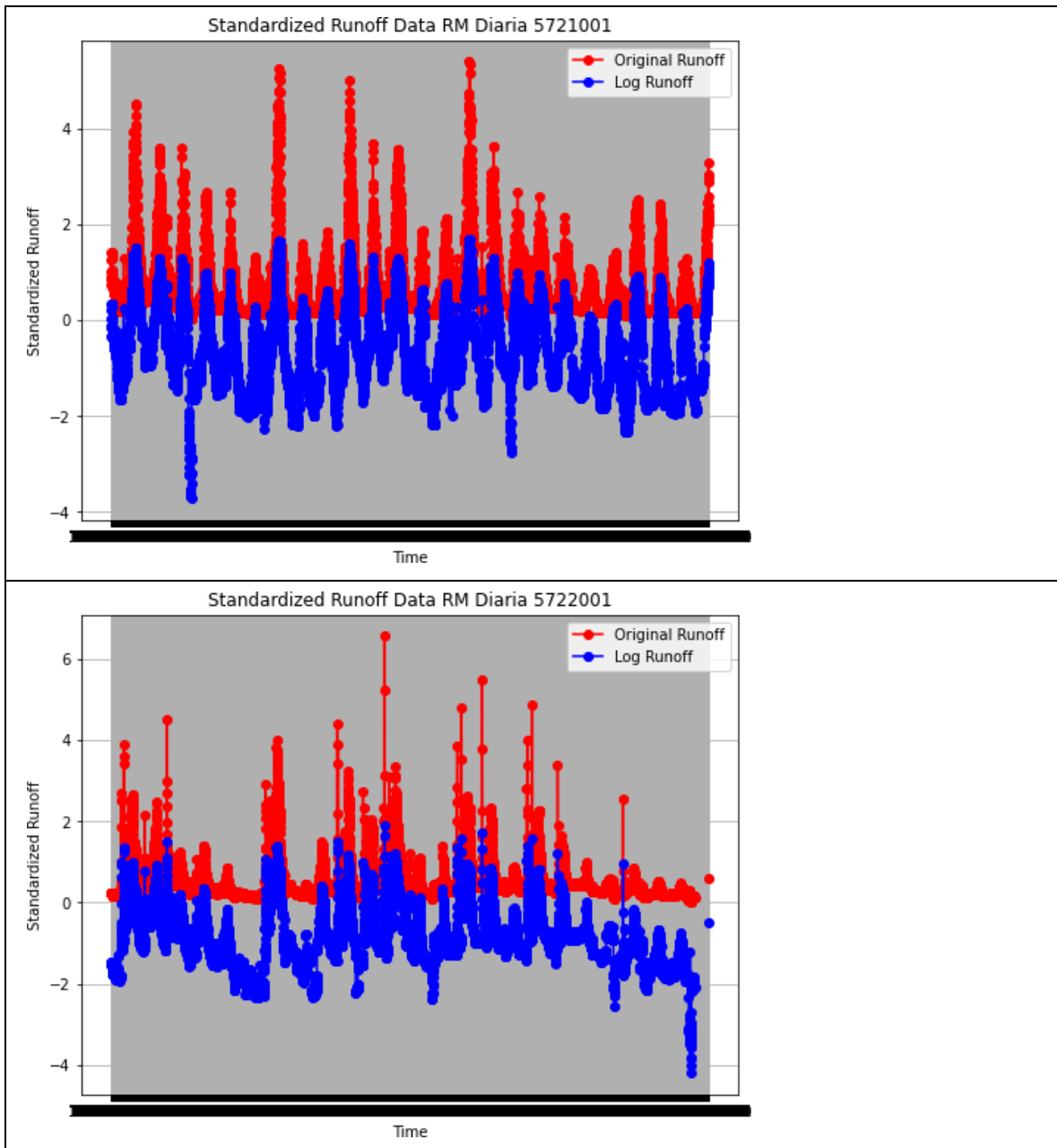
2 Anexo 2: Transformación Logarítmica

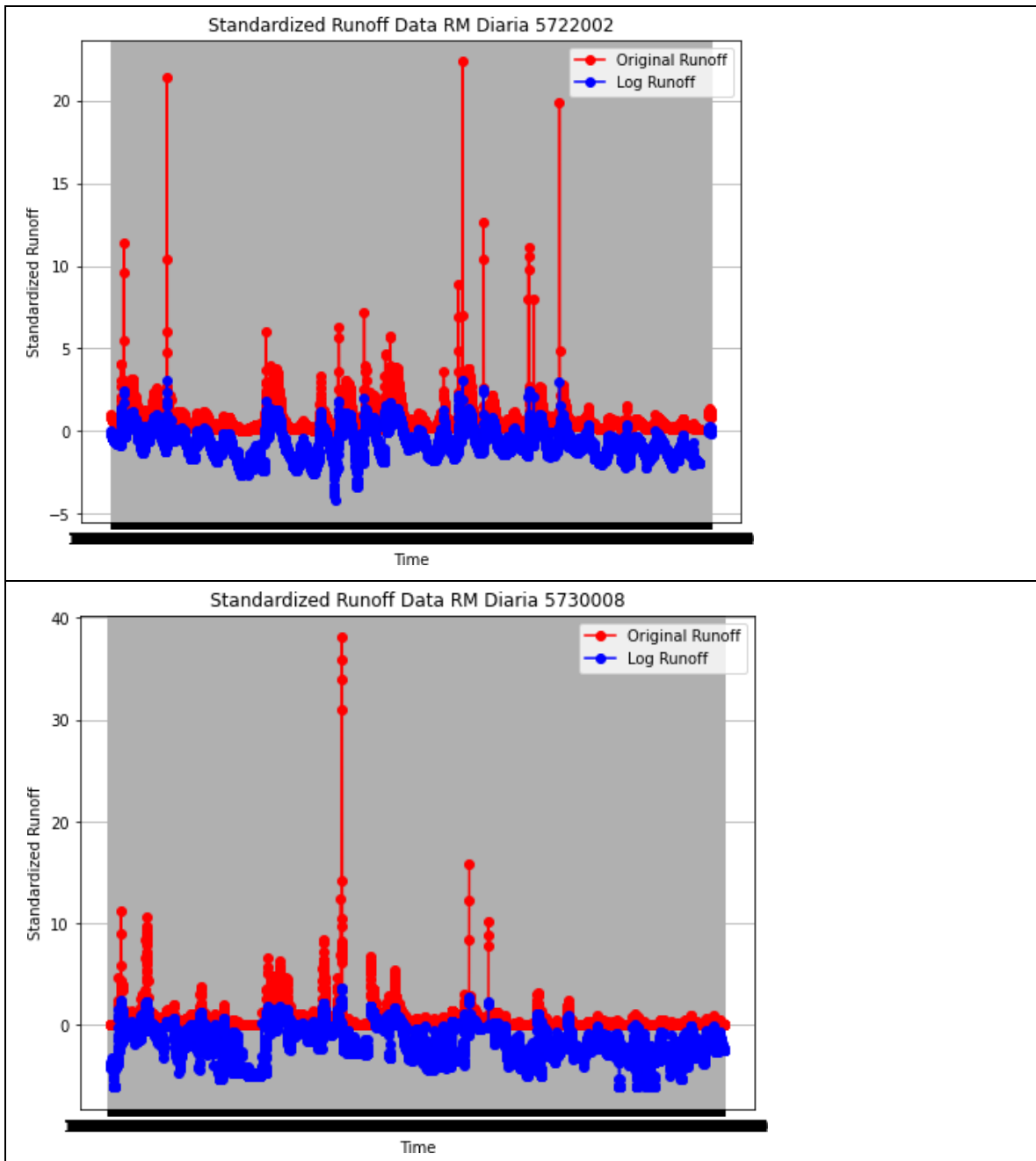
Se presentan a continuación las ilustraciones con los datos de caudal, de cada estación, graficados junto a la transformada logarítmica de la serie correspondiente

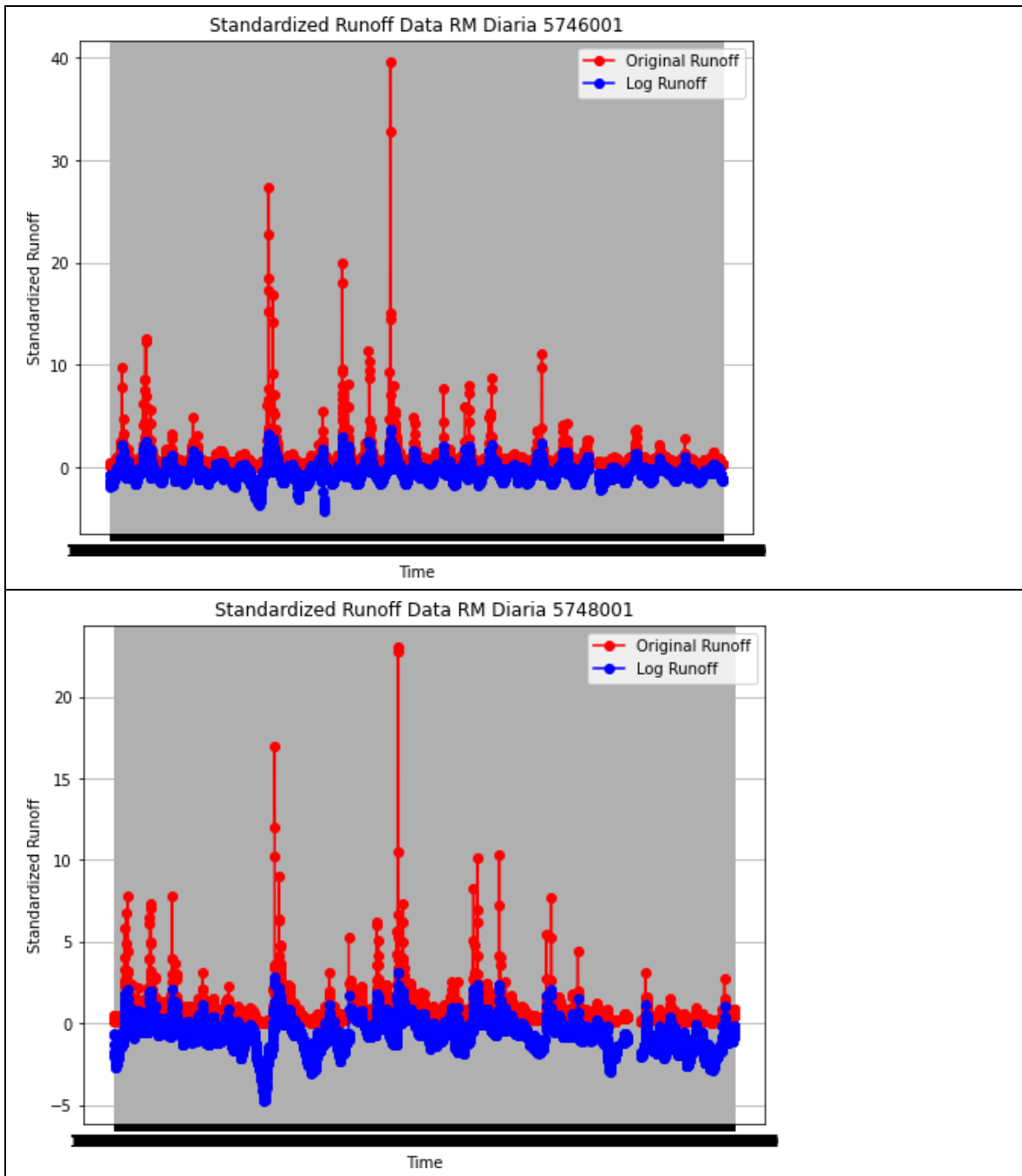
2.1 Caudal Diario

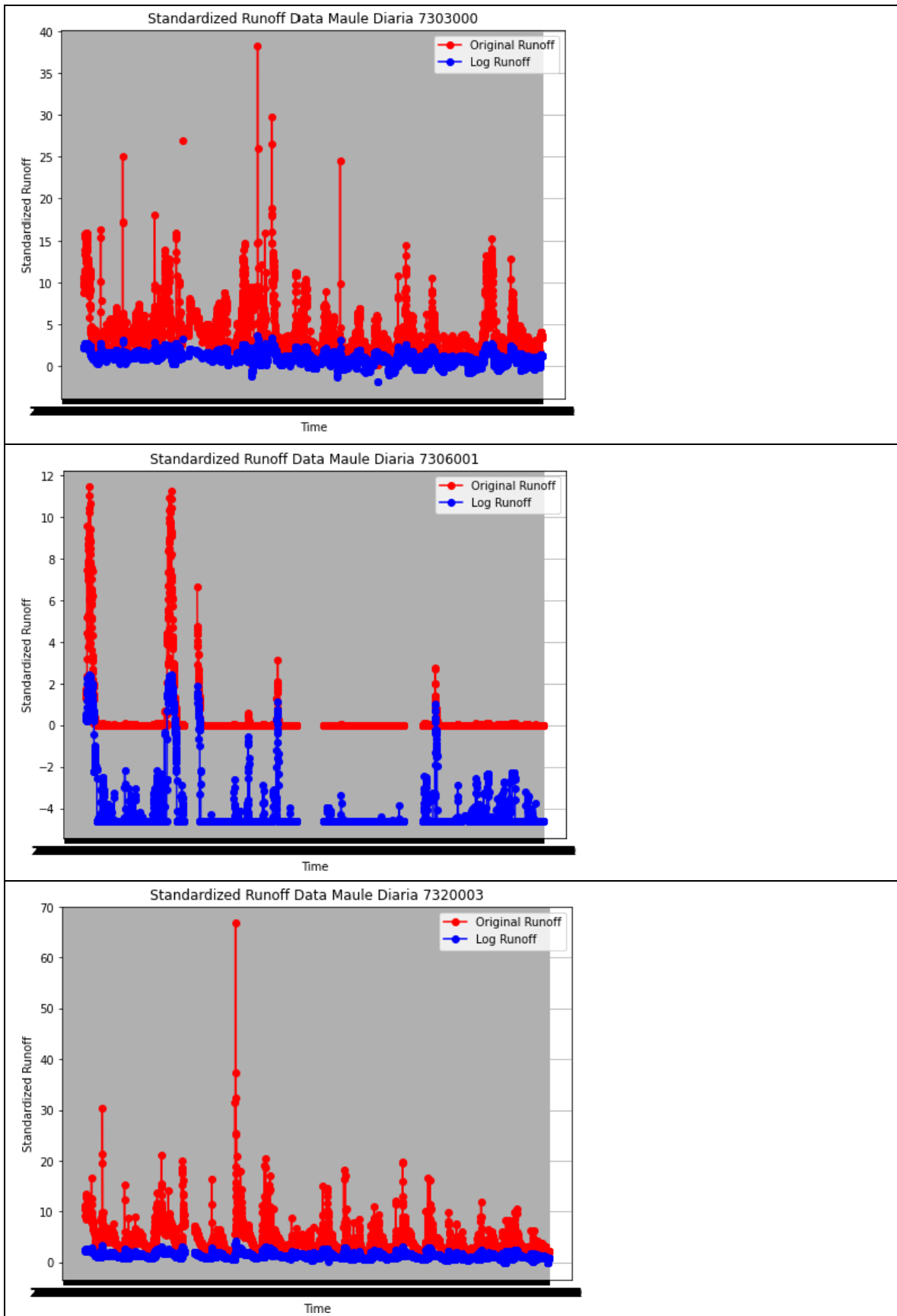


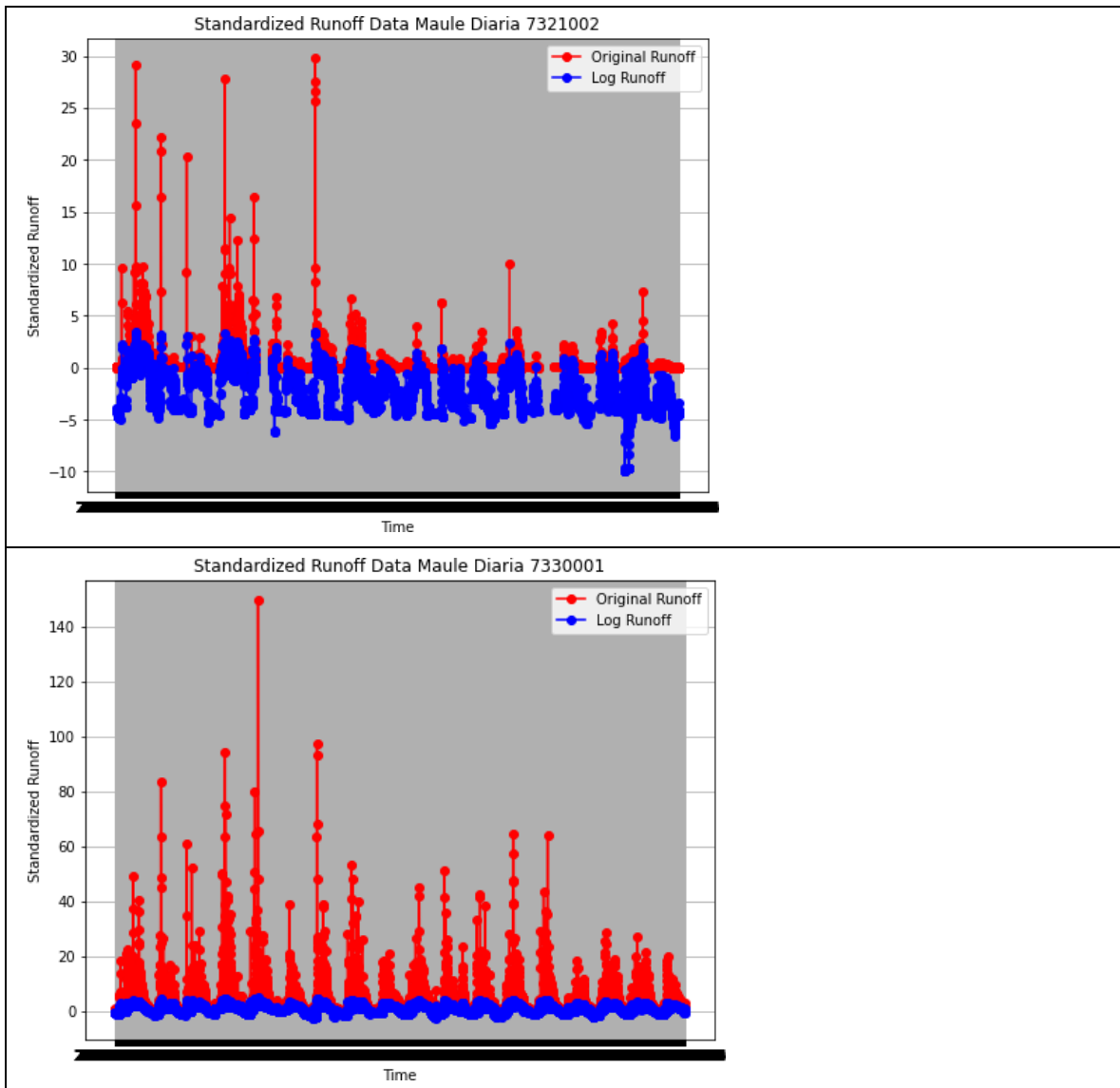


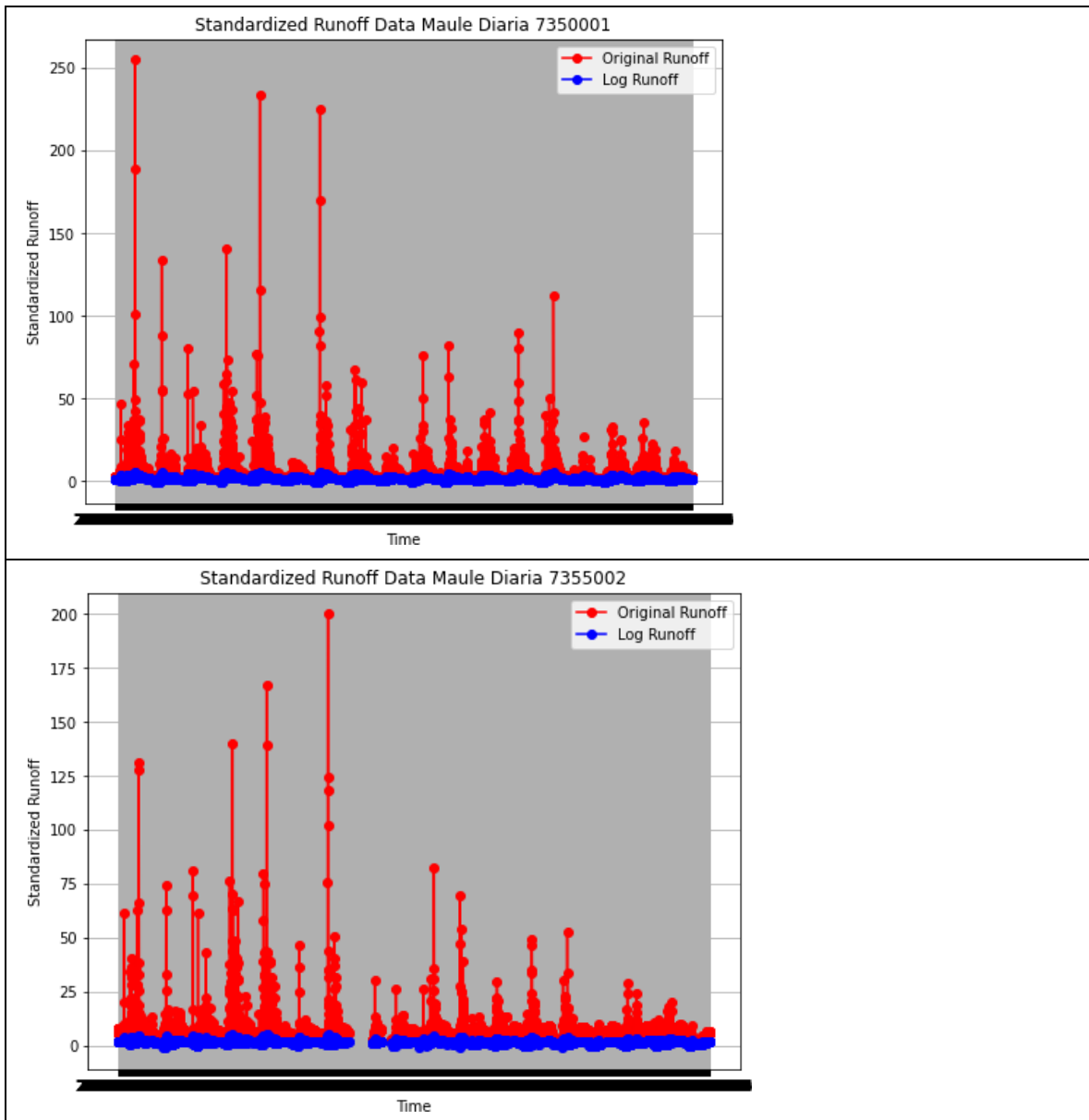


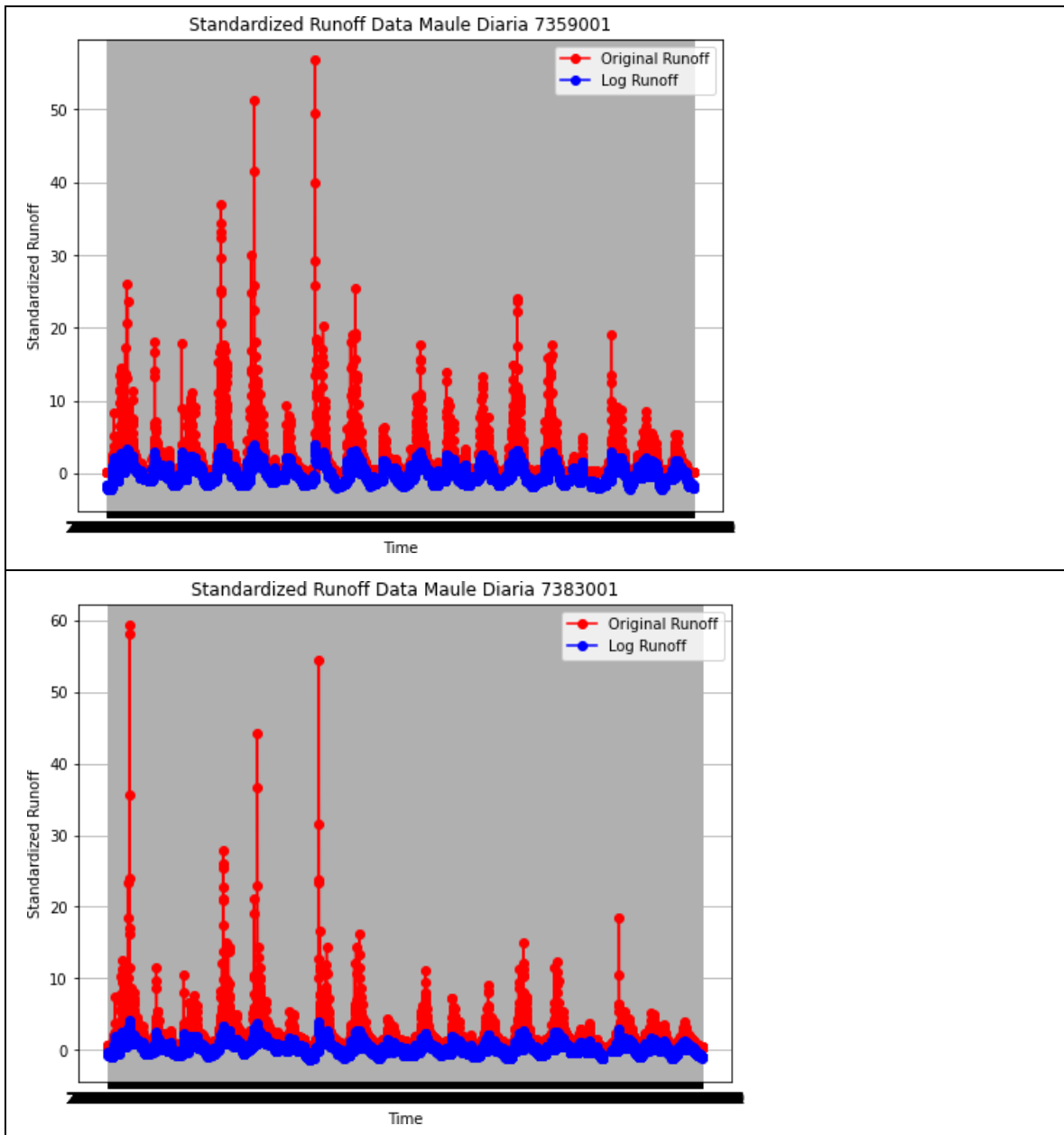




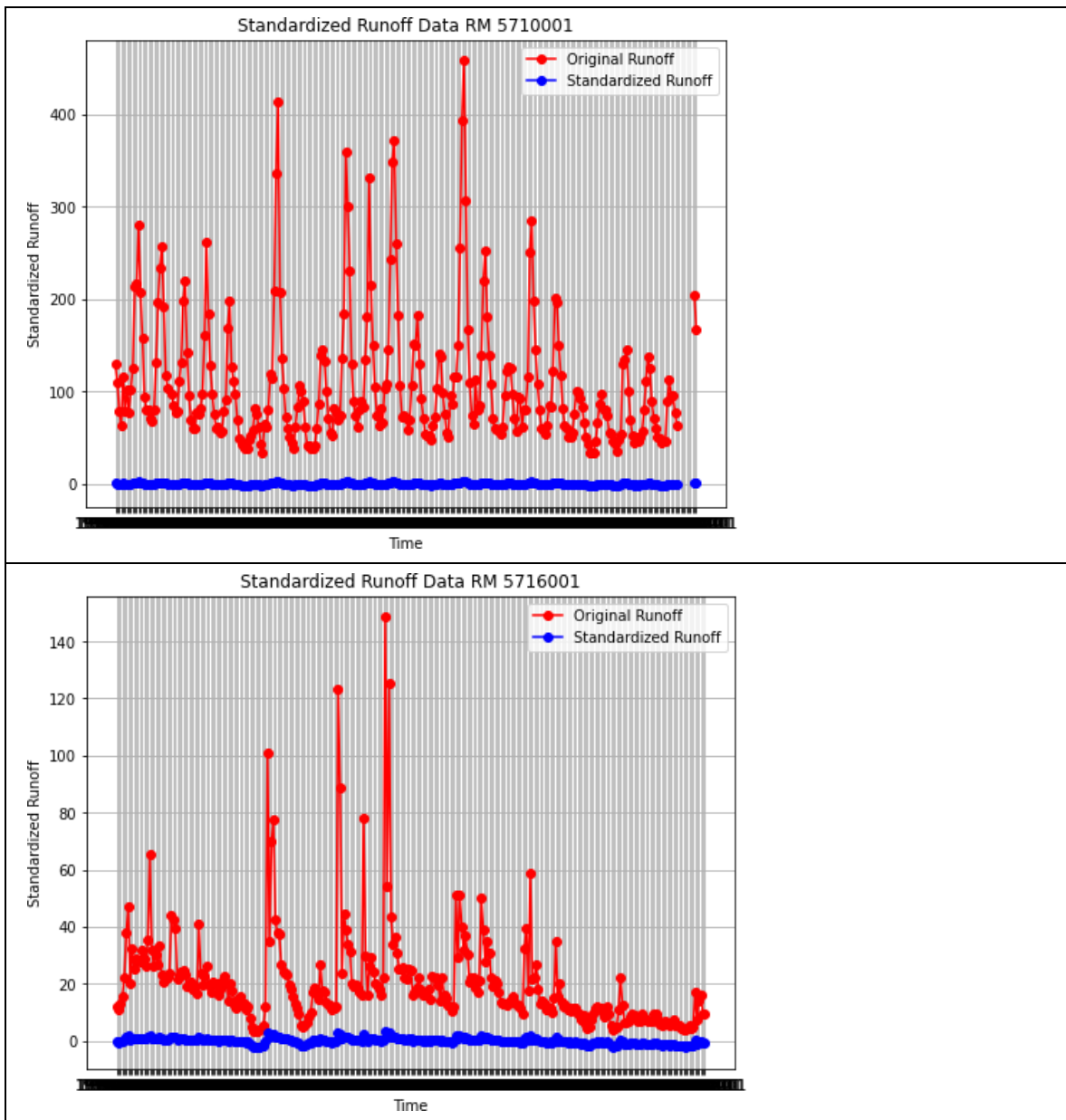


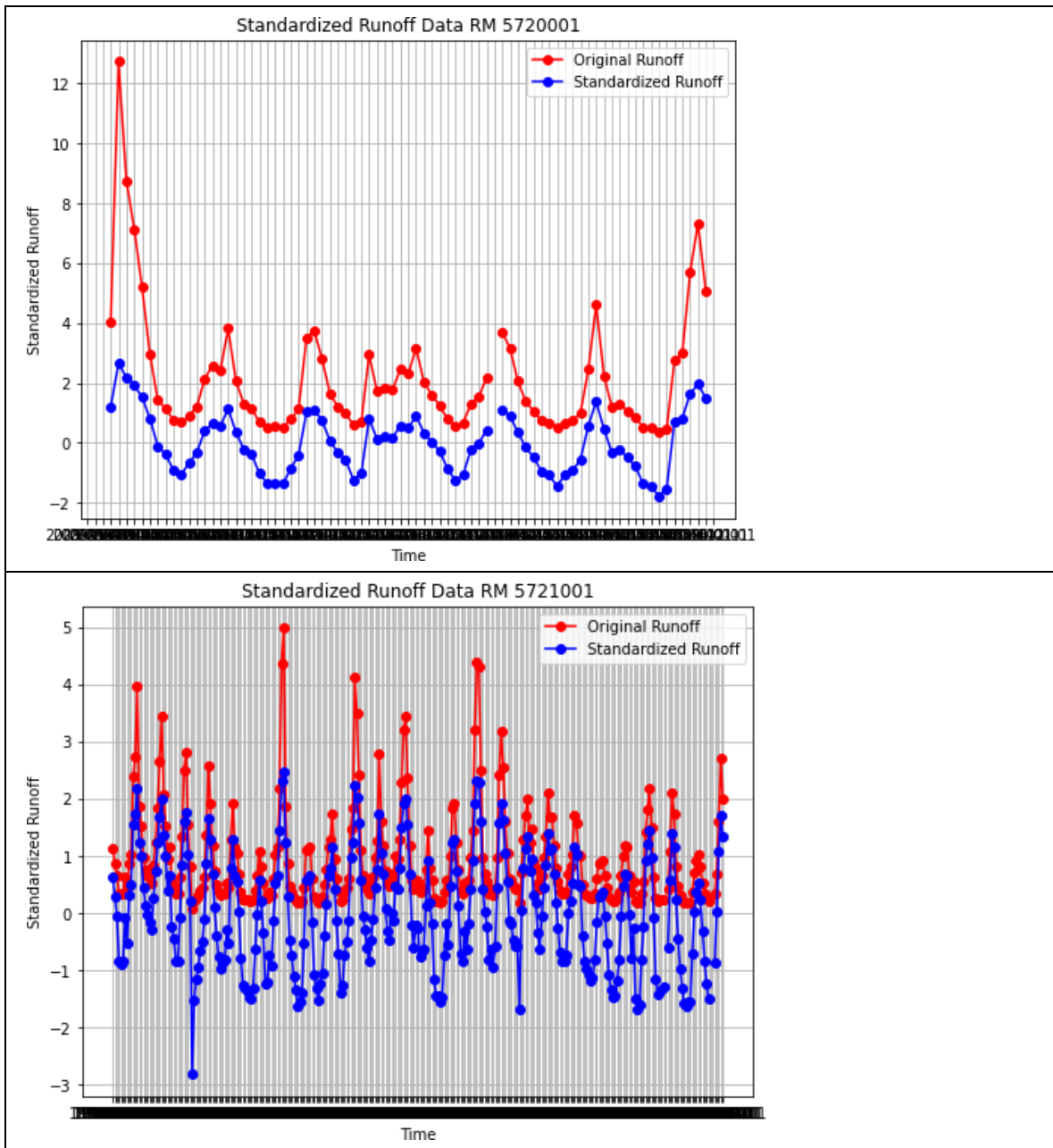


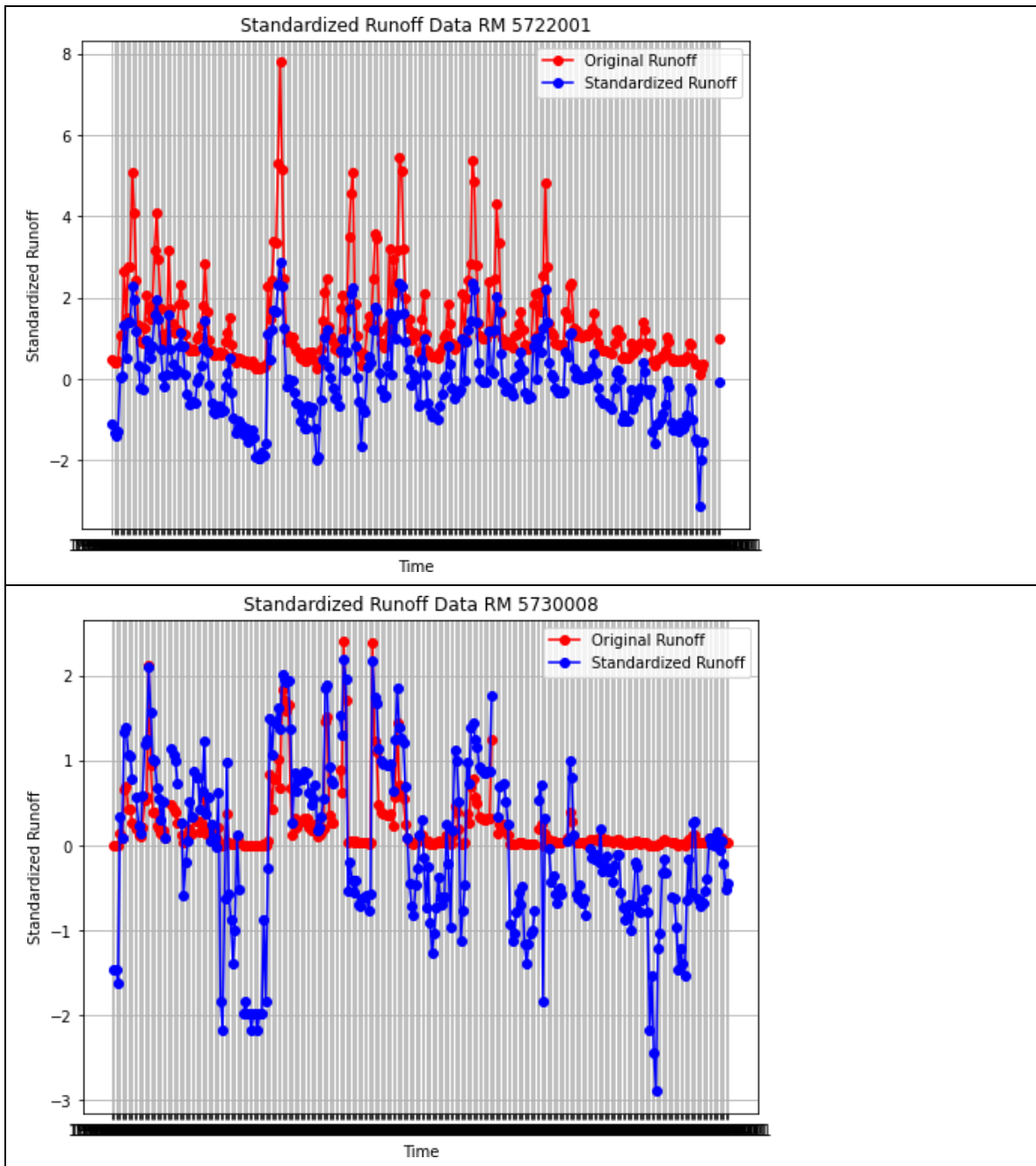


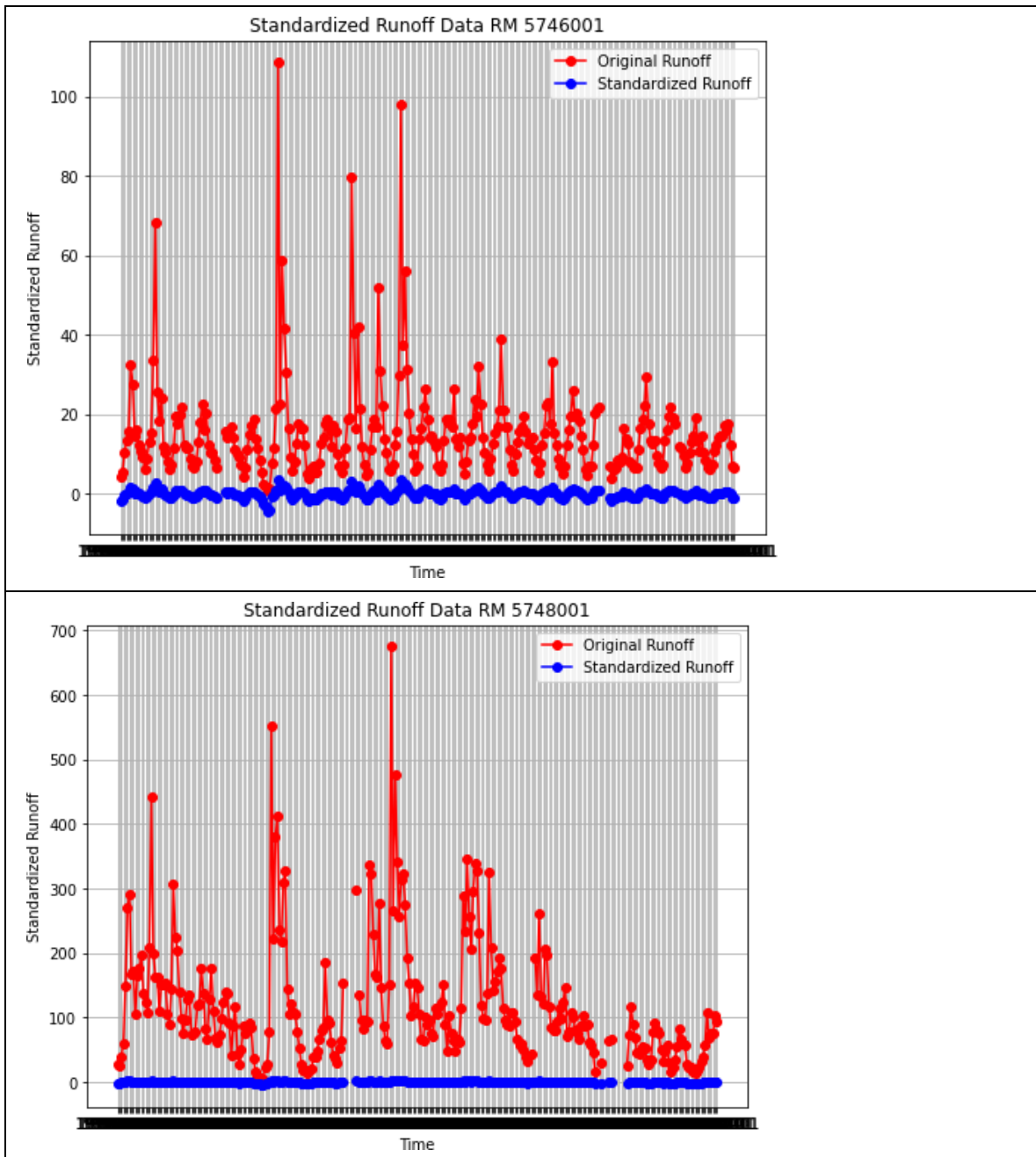


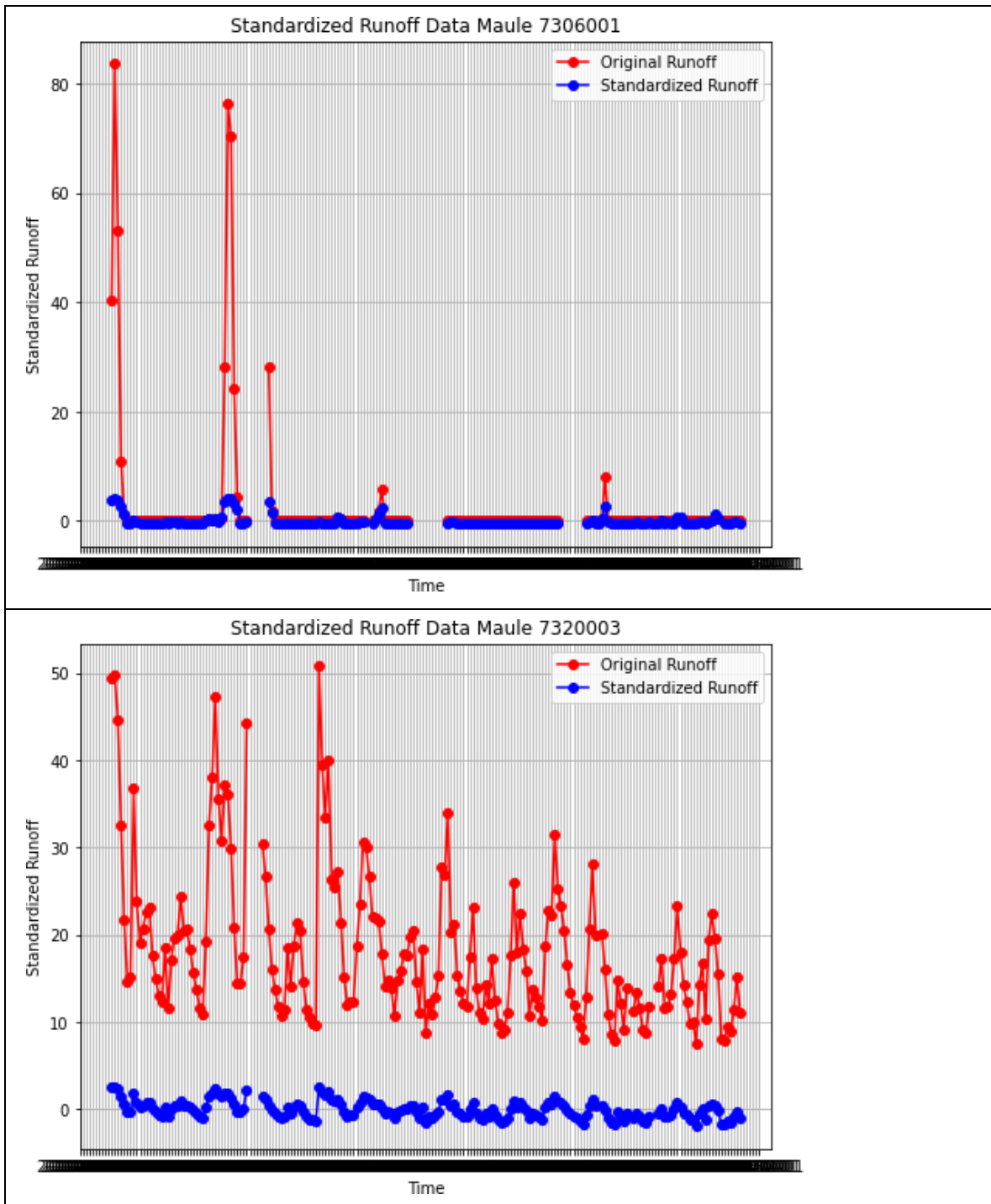
2.2 Caudal Mensual Acumulado

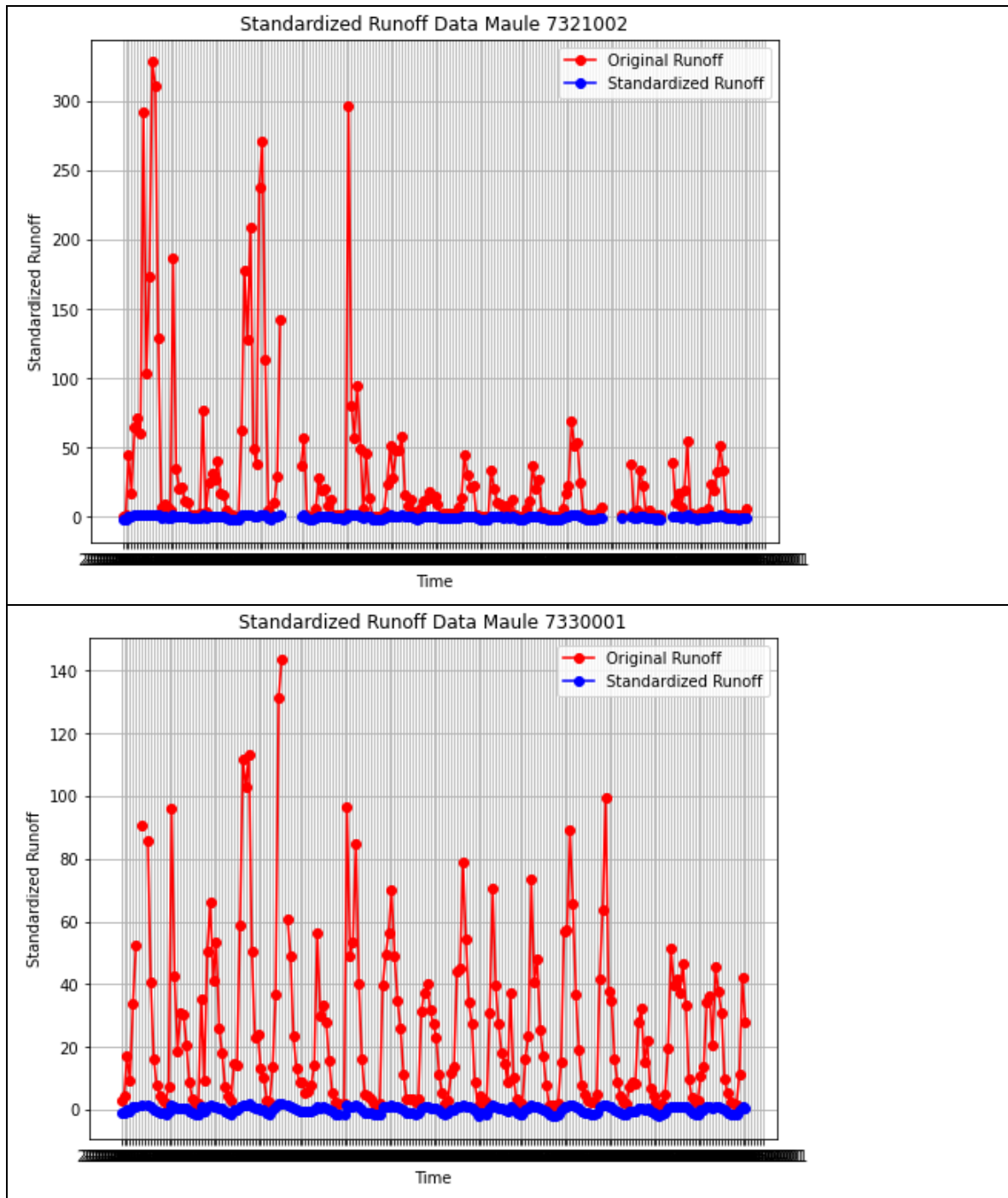


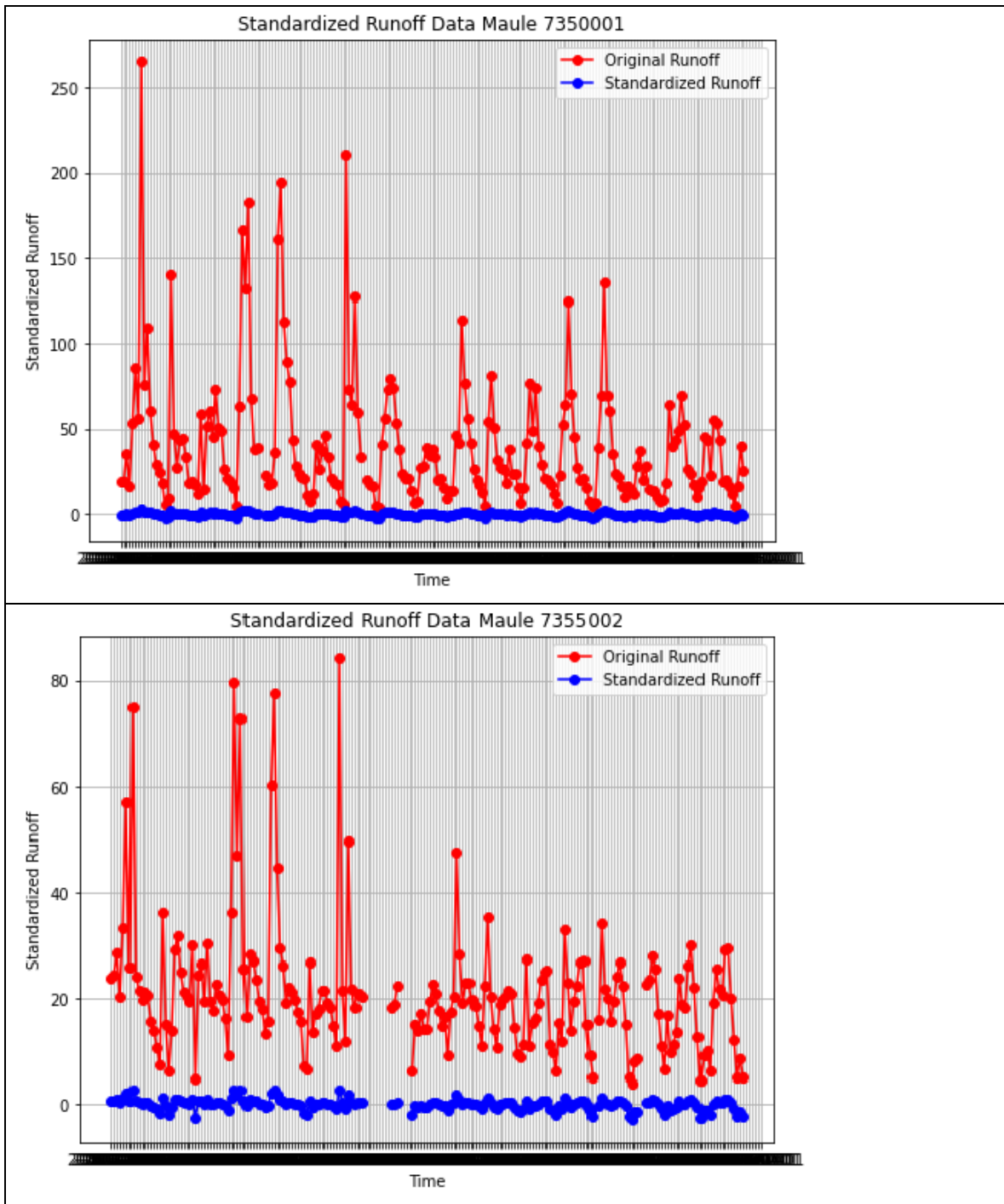


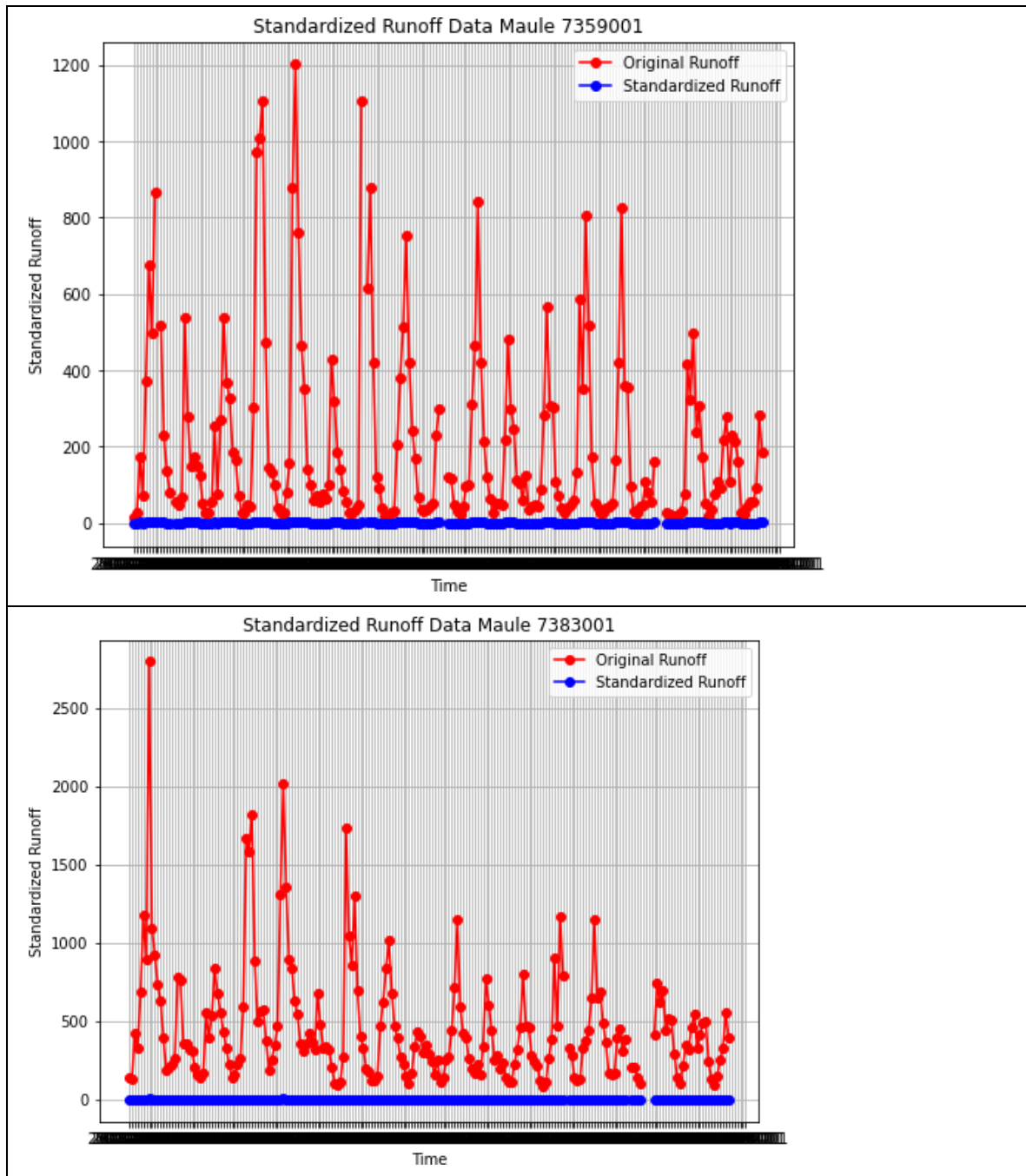






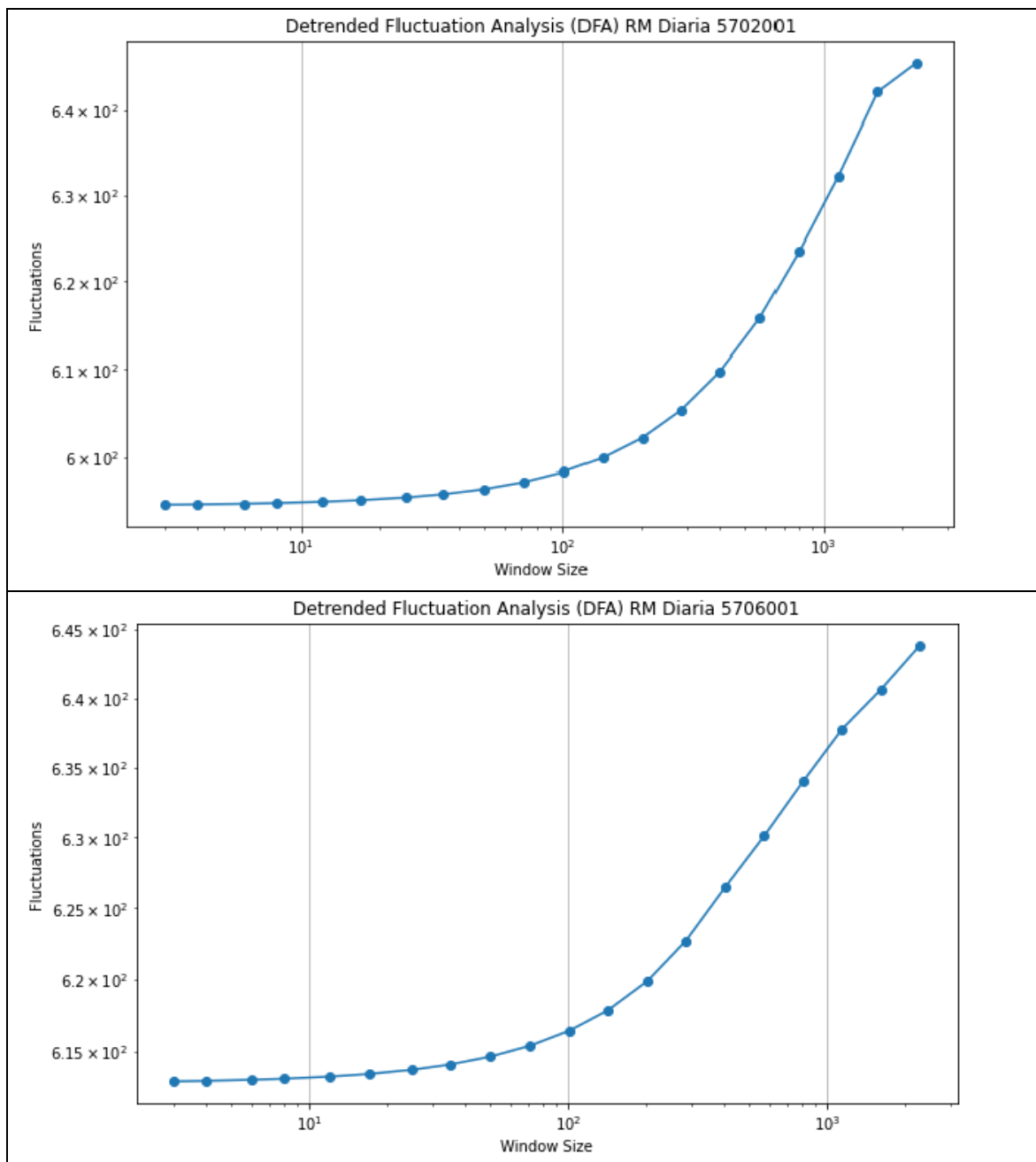


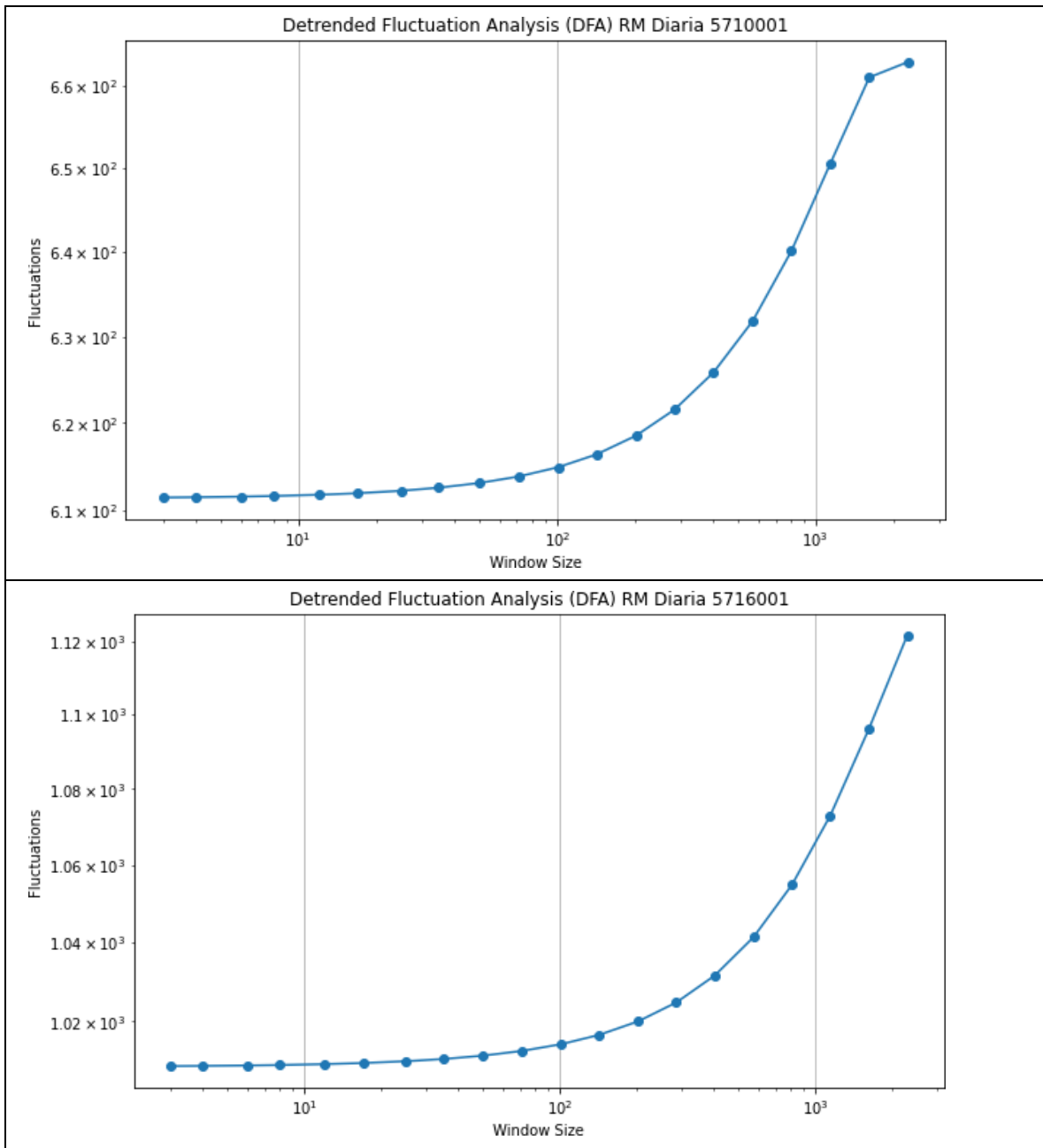


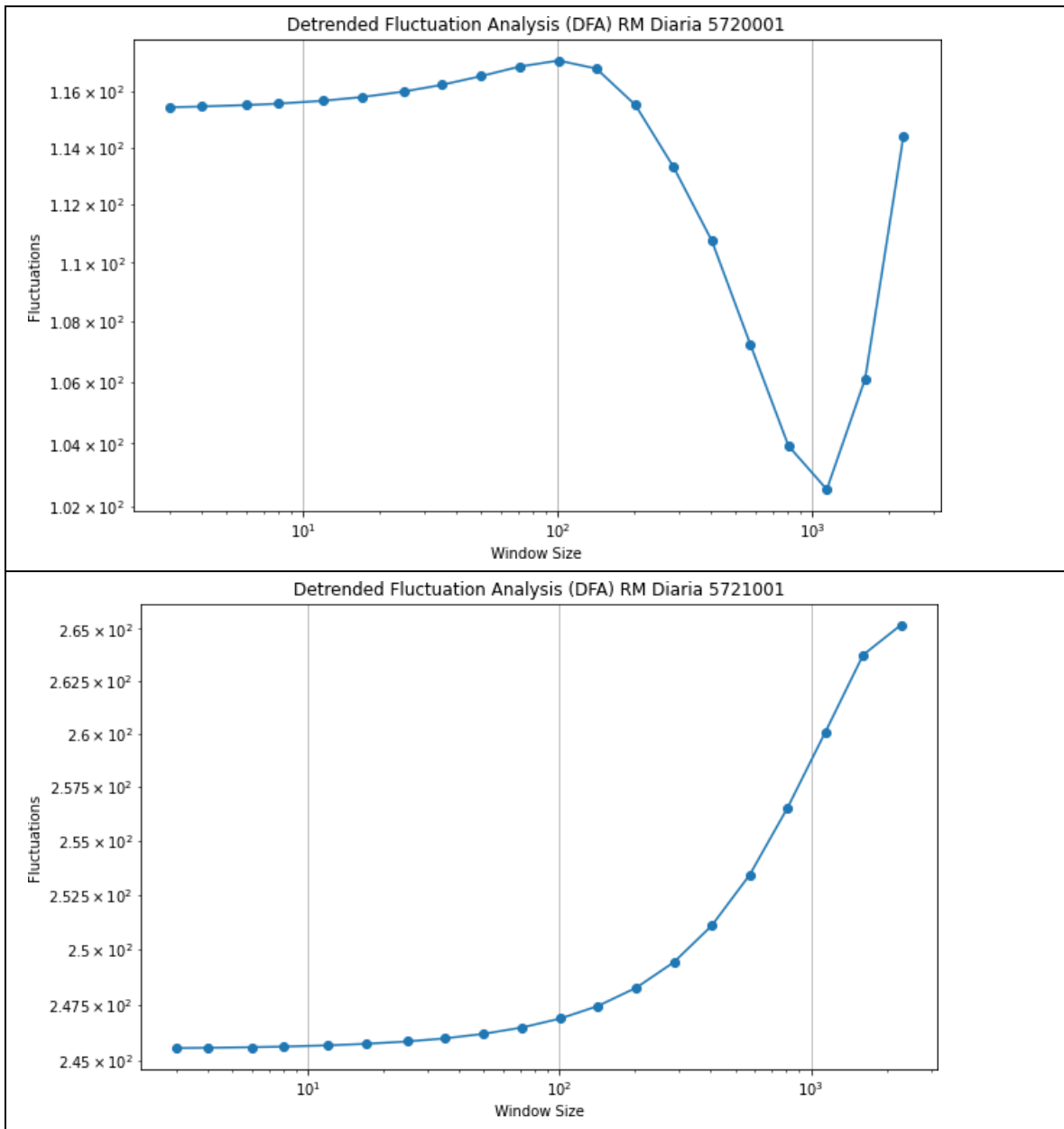


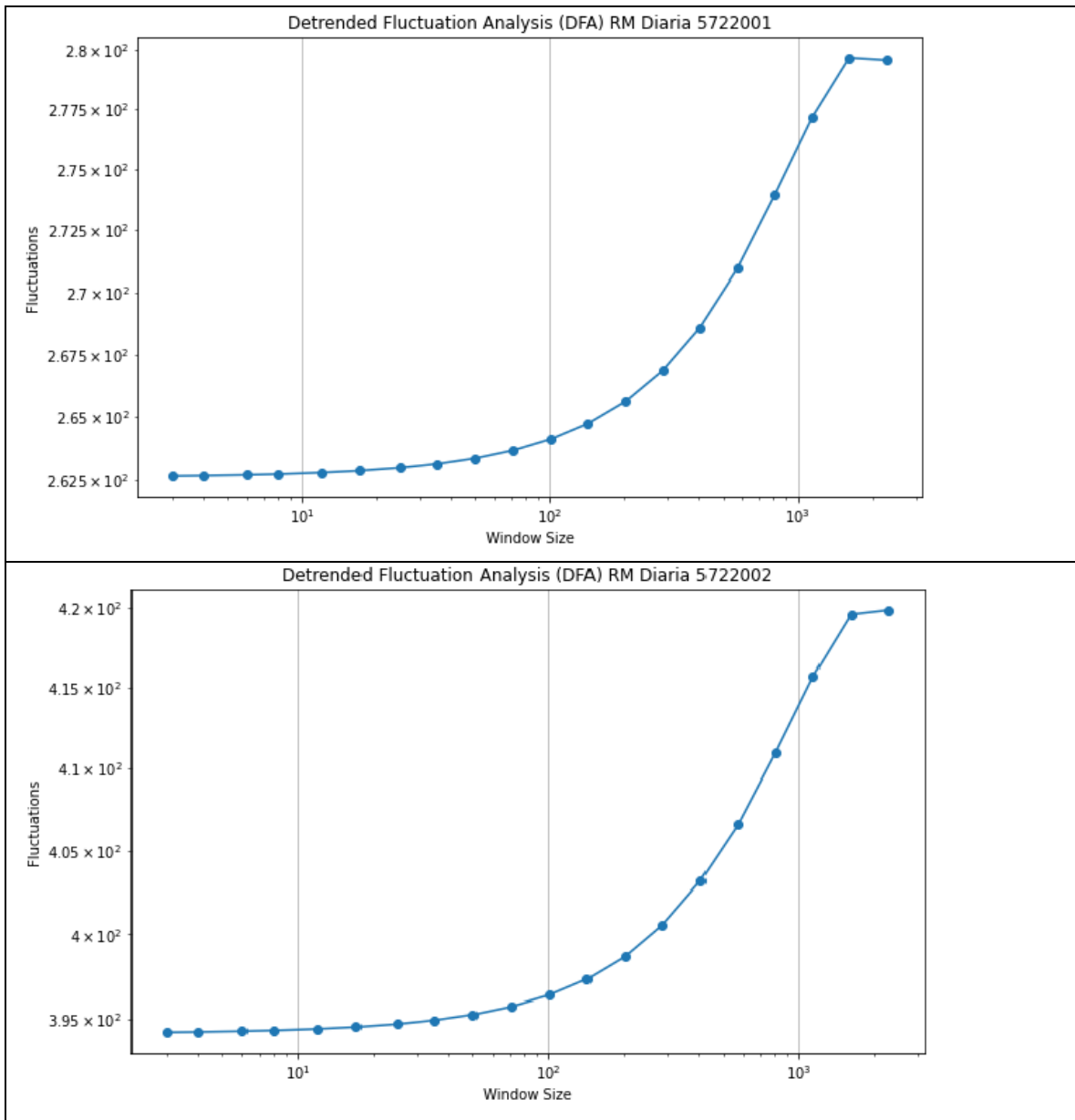
3 Anexo 3: Análisis de Fluctuación Detrended (AFD)

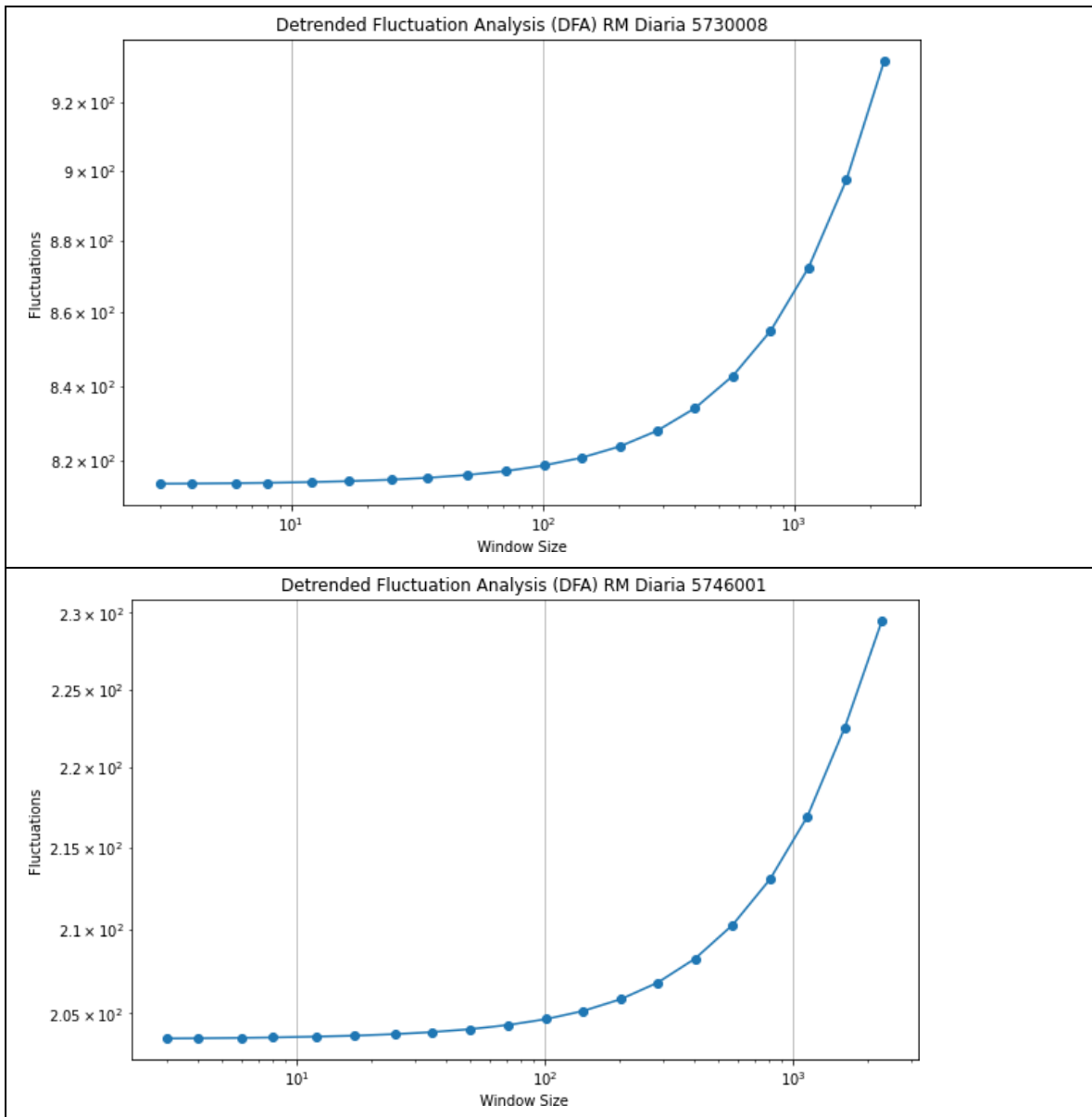
3.1 Caudal Diario

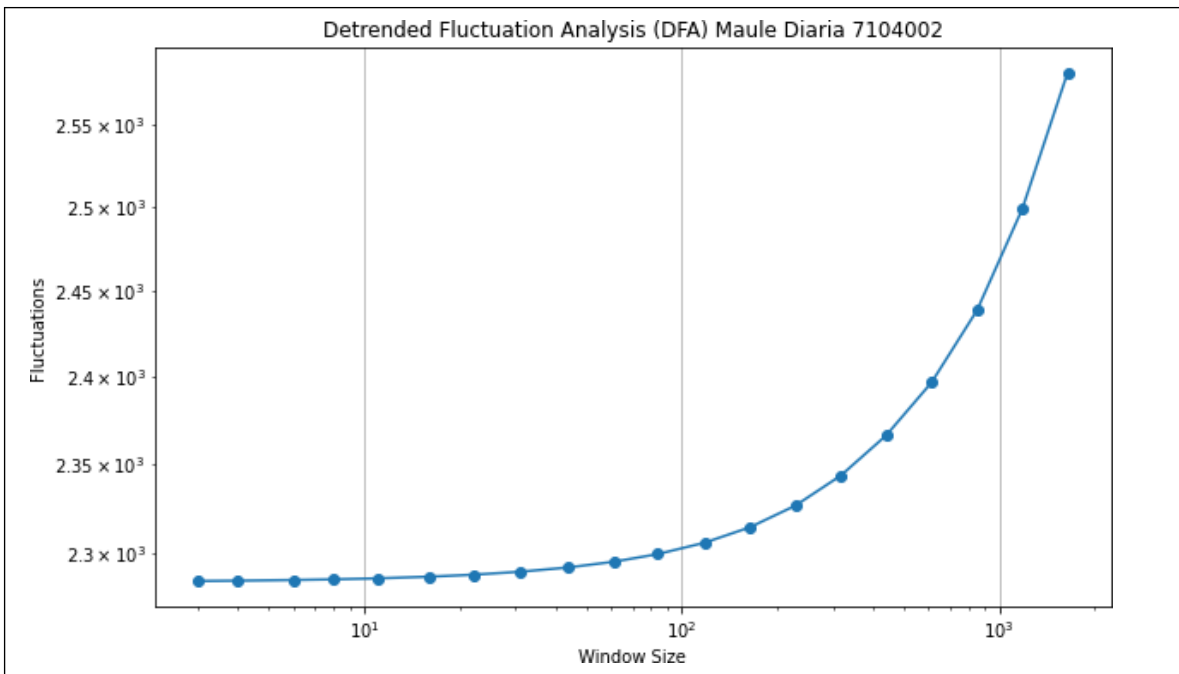
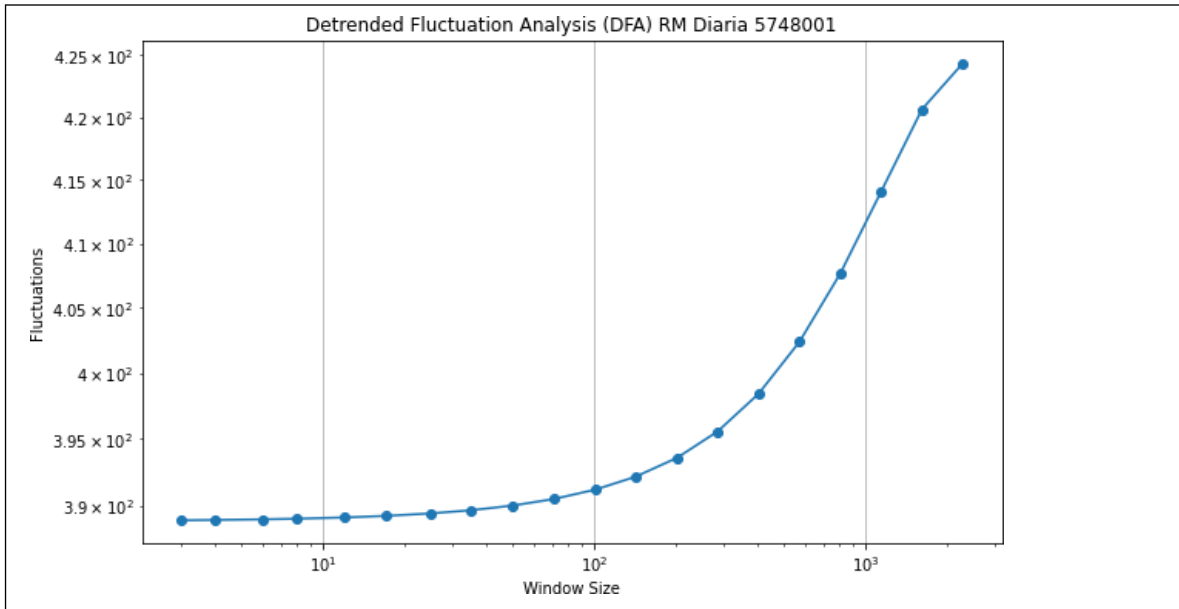


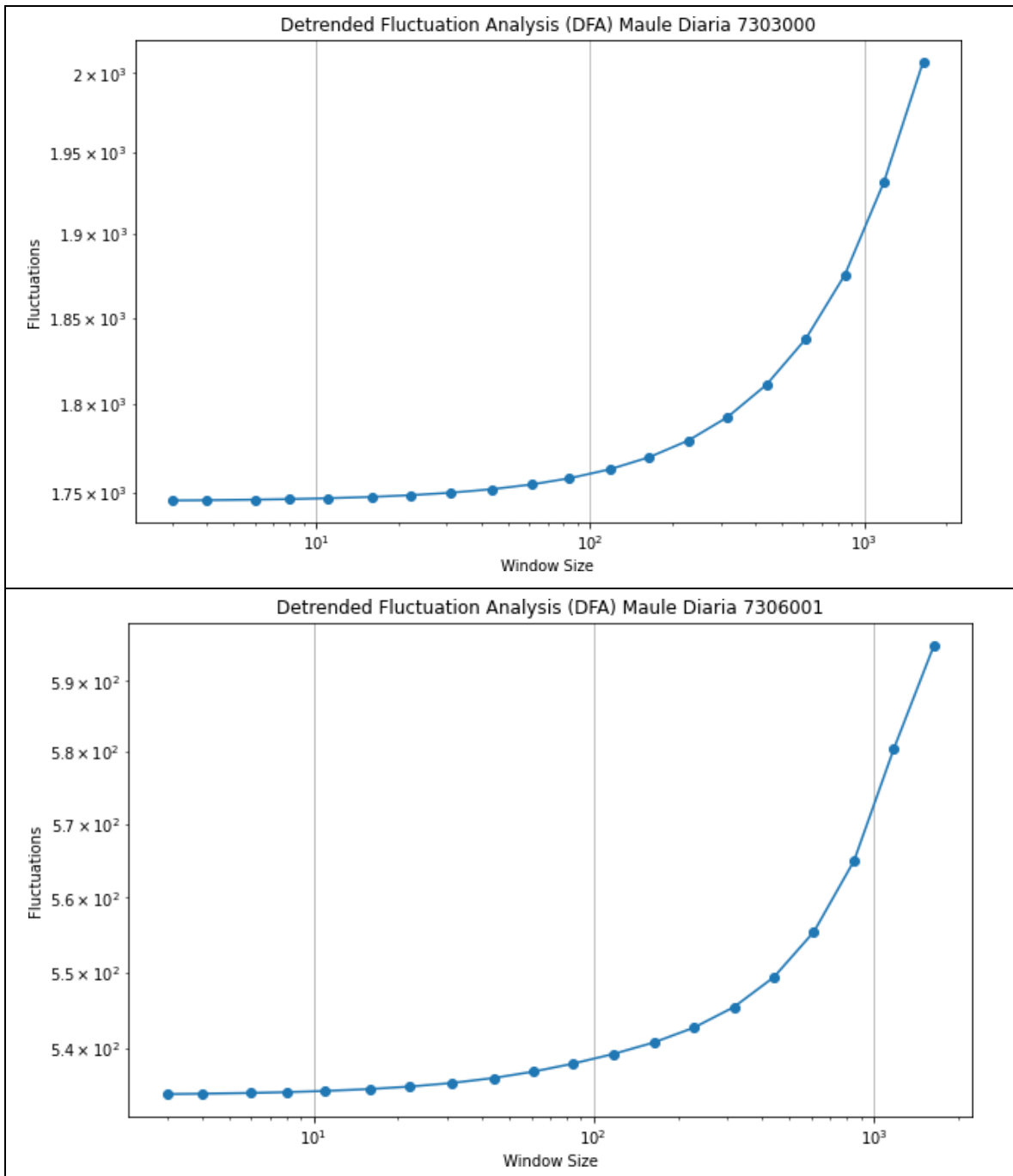


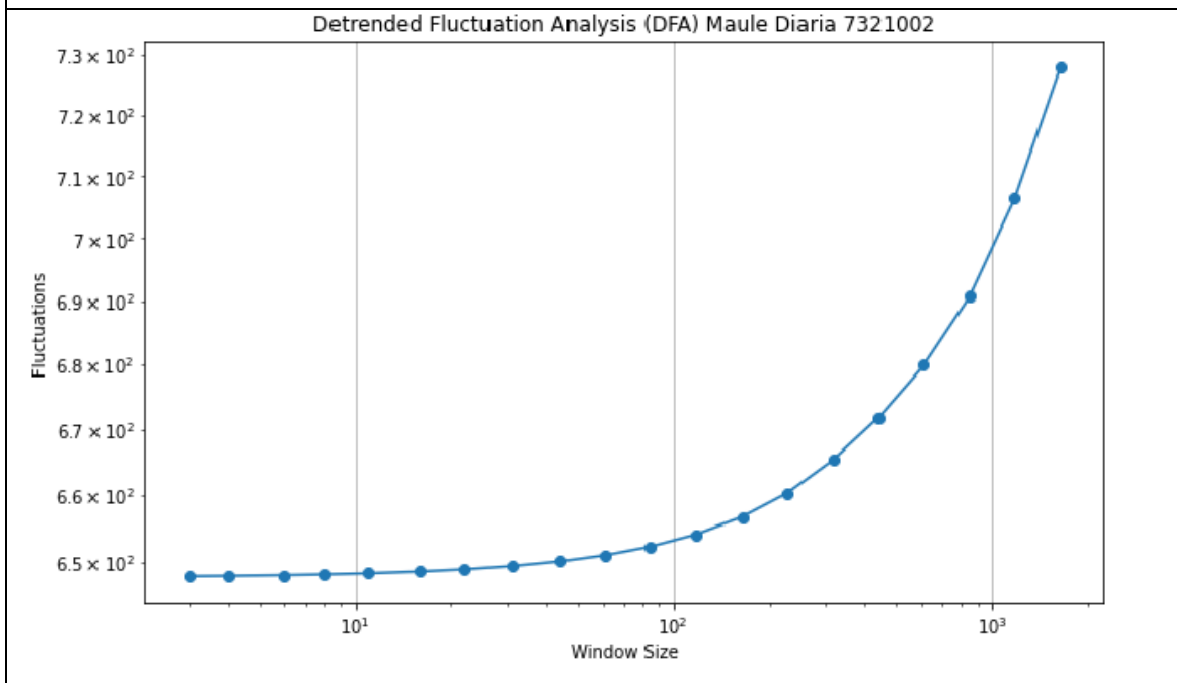
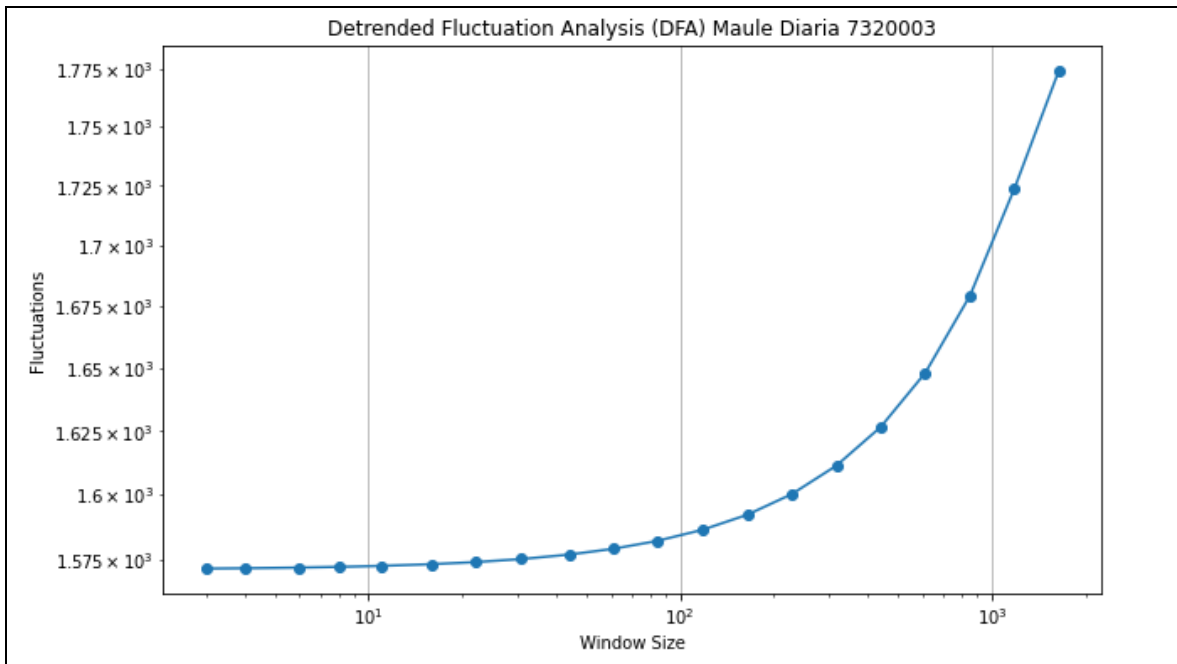


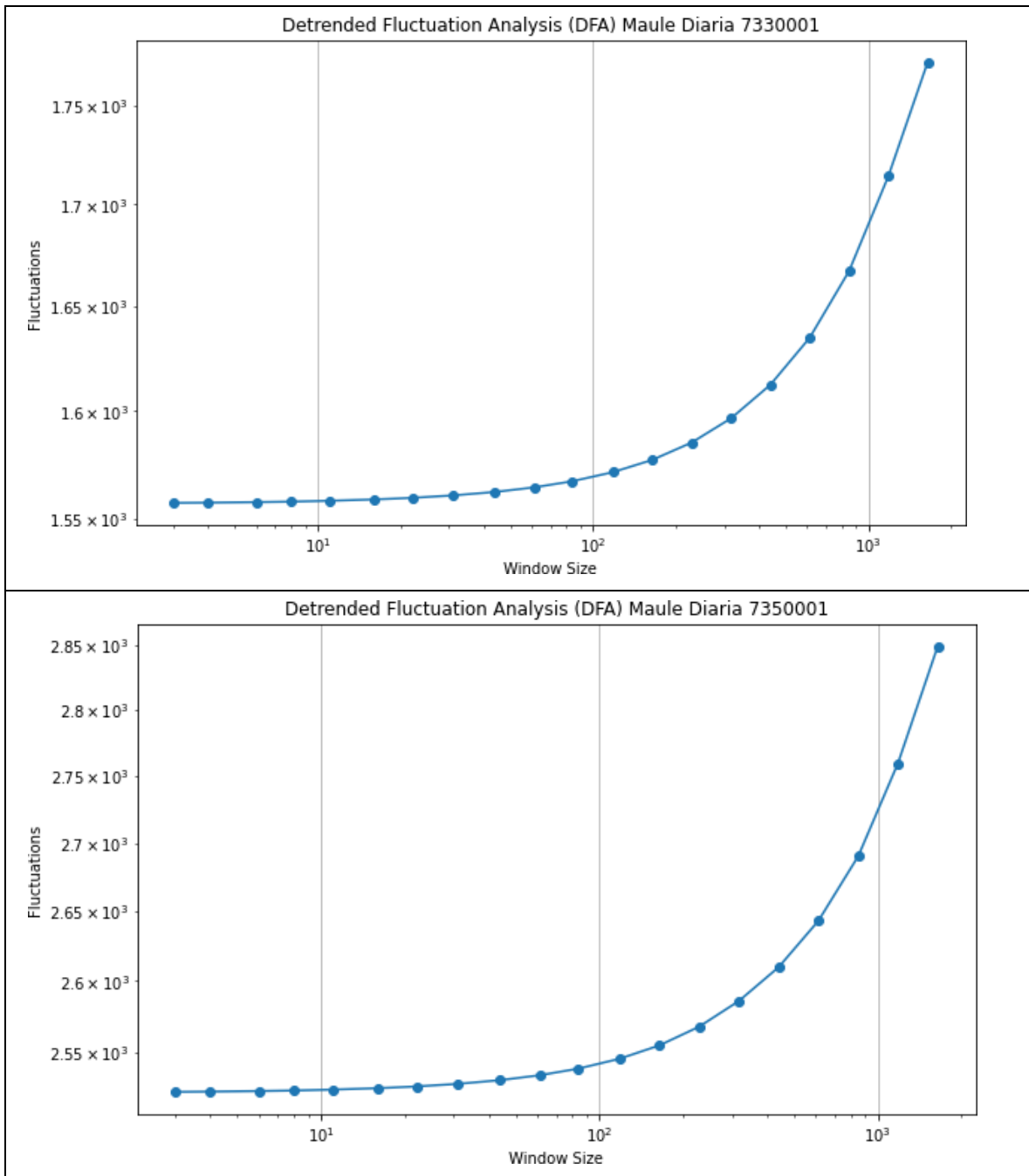


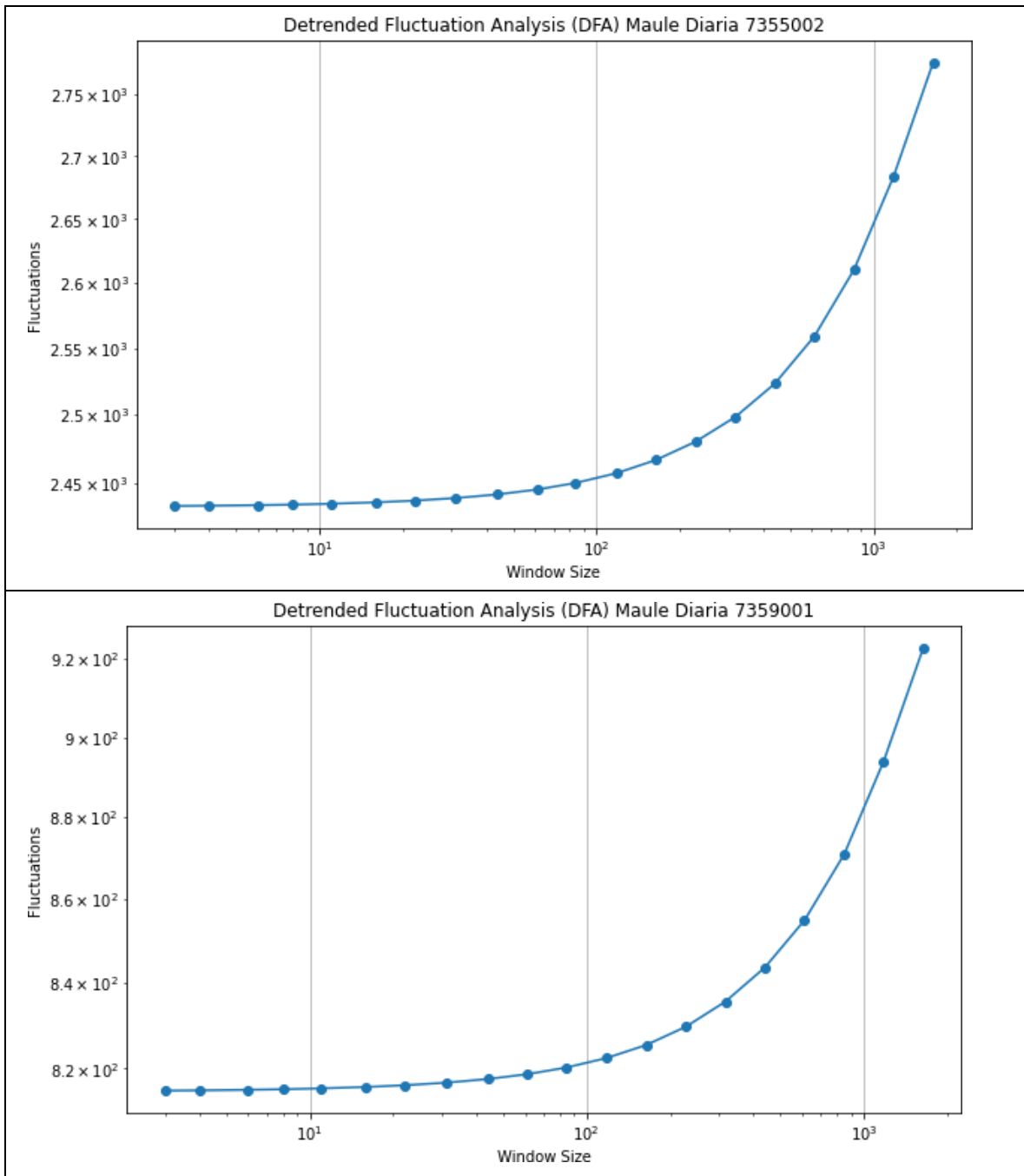


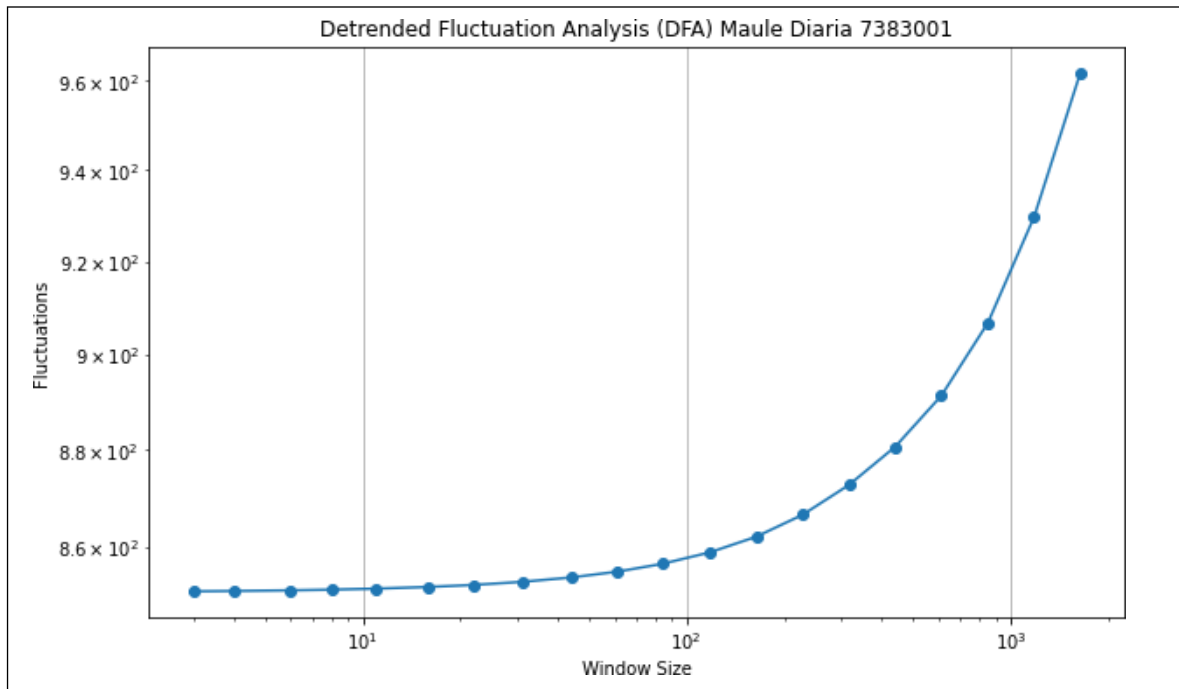












3.2 Caudal Mensual Acumulado

