



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO
VIRILLA, VALLE CENTRAL, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

PAULA ANDREA CALDERÓN ARCE

PROFESORA GUIA
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MARCELO OLIVARES ALVEAL
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR POR EL
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA**

POR: PAULA ANDREA CALDERÓN ARCE

FECHA: NOVIEMBRE de 2017.

PROFESORA GUÍA: XIMENA VARGAS MESA

**ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO
VIRILLA, VALLE CENTRAL, COSTA RICA**

En la actualidad, el cambio climático y sus efectos sobre la disponibilidad del recurso hídrico en diferentes regiones del planeta representan un tema de gran importancia y preocupación a nivel mundial. Además, los análisis realizados por IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y demás organizaciones de expertos respecto a estos temas, hacen que sea de vital importancia conocer el detalle de estos efectos para cada región del planeta.

En el presente trabajo, se analiza la disponibilidad de recurso hídrico para una región del Valle Central de Costa Rica, en específico la cuenca del río Virilla a la altura de la estación Nuestro Amo. Para esto se utilizan tres modelos de circulación global (GCM por sus siglas en inglés) y dos escenarios RCP, 4.5 y 8.5. Además, se realiza una subdivisión del área de estudio en cuatro subcuencas, en las cuales se calibraron los parámetros de un modelo de carácter semi-distribuido con características conceptuales y de base física, WEAP. Los modelos se calibran a escala mensual.

Las variaciones en cambio climático se analizaron a partir de las variables meteorológicas agrupadas en tres períodos, línea base (1985/86-2004/05), futuro cercano (2015/16-2044/45) y futuro lejano (2045/46-2074/75). Se obtiene que, para el futuro cercano, en promedio los modelos estiman un aumento de temperatura de 1,1°C y 2°C y para el futuro lejano aumentos de entre 1,8°C y 2,6°C, RCP 4.5 y 8.5 respectivamente. En lo referente a precipitación anual, en el futuro cercano se proyectan disminuciones que oscilan entre los 55mm y los 116mm mientras que para el futuro lejano se estiman aumentos que podrían rondar los 109 y los 151 mm, RCP 4.5 y 8.5 respectivamente en ambos casos.

Finalmente, en lo referente a caudales, se proyectan en el futuro cercano disminuciones de hasta un 23% mientras que al mismo tiempo se estiman aumentos que ascienden al 50% de la variable para el RCP 4.5. En el caso del RCP 8.5, las disminuciones son de aproximadamente 32% y los aumentos de hasta un 76%. Por otro lado, para el futuro lejano, se proyectan disminuciones de hasta un 81% para ambos RCP y aumentos de entre 53% y 48% para RCP 4.5 y 8.5 respectivamente.

*A mis amados padres, que siempre han estado a mi lado
apoyándome en cada etapa de mi vida
y sin cuya compañía, guía y comprensión
nada de esto habría sido posible.*

Agradecimientos

La tarea de profundizar sobre la cuenca del río Virilla de Costa Rica no ha sido fácil, y prácticamente no era posible sin la ayuda de muchas personas.

Deseo destacar, en primer lugar, la labor de mi Tutora, la profesora Ximena Vargas. He tenido el privilegio de trabajar con ella por prácticamente 4 semestres, desde que compartimos las primeras ideas, durante la formulación del proyecto y el arduo trabajo de su ejecución, incluyendo la etapa de la edición del informe final. Ha sido una extraordinaria experiencia que, sin duda, ha marcado con fuerza mi formación académica y profesional.

Los profesores Marcelo Olivares y Pablo Mendoza han sido mis lectores. Les agradezco en todo lo que vale haber destinado parte de su valioso tiempo para dedicarse a este trabajo y por sus valiosas observaciones.

Esta investigación implicó, entre muchas otras cosas, trabajar con herramientas informáticas que requerían algunos conocimientos de programación, cuyas bases realmente las empecé con algunos cursos del programa de maestría. Desde ese momento, dado que nuestra formación en Costa Rica en esa disciplina es de carácter general, tuve que trabajar mucho tiempo extra para llegar al punto requerido en los cursos, primero, y en esta investigación después. Sin embargo, la superación que he vivido en este campo no hubiera sido posible sin la generosa ayuda de varios compañeros, entre los que cabe mencionar a Jaime Vergara y a Salvador López. Para esta investigación, deseo expresar mi gratitud a Javier Cepeda y a Nicolás Vásquez. Ambos han sido muy importantes para superar mis múltiples limitaciones. En especial, quiero agradecer a Javier, quien siempre tuvo la disposición y amabilidad para ayudarme, en numerosas oportunidades, a ubicar parte de los problemas que una y otra vez me impedían avanzar. Fueron ayudas cruciales y siempre les estaré profundamente agradecida.

Este trabajo de investigación incluye áreas importantes en las que he tenido que aprender muy rápido. El uso de información meteorológica de manera rigurosa fue en enorme reto. Sin embargo, eso era prácticamente imposible si no hubiera contado con la desinteresada colaboración de mi querida amiga Karina Hernández, meteoróloga del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. Ella me ayudó a comprender mejor la conceptualización técnica, me ayudó a resolver el mejor uso de la información especializada y, ha sido una verdadera guía en esta especialización. Estoy, muy agradecida con su paciencia, su compromiso y por compartir sus conocimientos.

Por otro lado, he tenido que contar con una importante base de datos que me fue facilitada por dos prestigiosas instituciones costarricenses: El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN). Ambas instituciones son pilares

fundamentales para el desarrollo de mi querido país, y, también expreso mi gratitud a sus autoridades, y al personal directamente involucrado, el haber hecho posible el uso de esa valiosa información.

También deseo expresar mi agradecimiento a la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID) del Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile, por favorecerme en su programa de becas para realizar mi maestría en la Universidad de Chile. Extiendo mi agradecimiento al Gobierno de Chile y, en general, al pueblo chileno que es, en última instancia, el que comparte su generosidad con los pueblos del mundo. A Karina Vera y a Fernando Contreras mi más profundo agradecimiento por el gran apoyo y la comprensión durante todo este proceso.

No quiero dejar pasar la oportunidad de expresar mi gratitud a una persona que me ayudó en todo lo que estuvo a su alcance, y un poco más. Me refiero a Jacqueline Suárez, una ejemplar trabajadora, cuya bondad se extendió al punto de apoyarme hasta en los ámbitos emocionales y motivacionales, lo cual es muy importante para una extranjera en su primera experiencia de dos años fuera de casa.

Finalmente, deseo mencionar a Natalia Bustamante, quien de igual manera siempre estuvo presente ante cualquier guía que pudiera brindarme y además ha representado un apoyo muy importante en otros ámbitos que trascienden el académico.

A mi madre y a mi padre les agradezco por estar siempre a mi lado...

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Organización del informe.....	3
Capítulo 2. Revisión bibliográfica.....	5
2.1. Modelación hidrológica.....	5
2.1.1. Modelo WEAP.....	5
2.1.2. Forzantes del modelo hidrológico	6
2.1.3. Criterios de eficiencia	8
2.2. Cambio Climático	10
2.2.1. MPI-ESM	11
2.2.2. CSIRO-Mk3-6-0	11
2.2.3. CCSM4.....	12
Capítulo 3. Metodología	13
3.1. Modelación hidrológica.....	13
3.2. Cambio Climático	14
Capítulo 4. Descripción de la zona de estudio.....	15
4.1. Antecedentes	15
4.2. Cuenca del río Virilla	16
4.2.1. Información hidrometeorológica disponible.....	17
4.2.2. Características físicas y morfométricas	21
4.2.3. Características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas	23
4.2.4. Suelo	26
4.2.4.1. Tipo de suelo.....	26
4.2.4.2. Uso de suelo.....	29

Capítulo 5. Resultados de la modelación hidrológica.....	31
5.1. Resultados Calibración.....	32
5.2. Resultados Validación.....	35
5.3. Escenarios de Cambio Climático.....	38
5.4. Discusión.....	48
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	51
Bibliografía.....	53
Anexos.....	58
A.1. Funciones de transferencia (Digital).....	58
A.2. Metodología de estimación de nubosidad.....	59

Índice de cuadros

Cuadro 4.1. Estaciones hidrometeorológicas y fluviométricas utilizadas.....	18
Cuadro 4.2. Promedio y desviación estándar de variables meteorológicas de la cuenca del río Virilla en la estación Nuestro Amo para el período 1984/85 – 2004/05.	19
Cuadro 4.3. Longitud de registro completo de datos de caudal por cuenca.	21
Cuadro 4.4. Elevación.	22
Cuadro 4.5. Parámetros de forma.....	23
Cuadro 4.6. Parámetros red de drenaje.....	23
Cuadro 4.7. Características de las unidades hidrogeológicas Colima Inferior y Colima Superior.	24
Cuadro 4.8. Detalle de clasificación geológica.	25
Cuadro 4.9. Detalle de clasificación geológica.	30
Cuadro 5.1. Períodos de calibración y validación.....	32
Cuadro 5.2. Resumen de cálculo los criterios de eficiencia en las cuencas calibradas.....	34
Cuadro 5.3. Parámetros obtenidos como resultado del proceso de calibración.....	35
Cuadro 5.4. Resumen de cálculo los criterios de eficiencia en las cuencas validadas.....	35
Cuadro 5.5. Estimación de variación temperatura [°C].....	41
Cuadro 5.6. Variaciones porcentuales de precipitación.....	44
Cuadro 5.7. Variaciones porcentuales de caudal.	47

Índice de figuras

Figura 1.1. Cambio observado en la temperatura en superficie, 1901-2012.	2
Figura 1.2. Anomalía observada en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas combinadas, 1850-2012.....	3
Figura 2.1. Elementos hidrológicos modelados en WEAP.....	7
Figura 3.1. Estructura metodológica básica de modelación hidrológica.	13
Figura 4.1. Ubicación zona de estudio.....	15
Figura 4.2. Cuenca del río Grande de Tárcoles.....	16
Figura 4.3. Curva de variación estacional. Cuenca del río Virilla a la altura de la estación Nuestro Amo.....	17
Figura 4.4. Distribución de estaciones meteorológicas y fluviométricas.....	18
Figura 4.5. Polígonos de Thiessen y bandas de elevación cuenca río Virilla.....	20
Figura 4.6. Modelo de elevación digital. Cuenca Río Virilla (C24_24).....	21
Figura 4.7. Curva hipsométrica. Cuenca del río Virilla.	22
Figura 4.8. Clasificación geológica. Cuenca río Virilla.....	26
Figura 4.9. Tipos de suelo. Cuenca río Virilla.....	27
Figura 4.10. Clasificación por uso de suelo en la cuenca del río Virilla.....	29
Figura 5.1. División de la cuenca del río Virilla en subcuencas de estudio.	31
Figura 5.2. Resultados de calibración cuenca C24_10: Linda Vista.....	32
Figura 5.3. Resultados de calibración cuenca C24_26: Subestación La Caja.	33
Figura 5.4. Resultados de calibración cuenca C24_29: Echeverría.	33
Figura 5.5. Resultados de calibración cuenca C24_24: Nuestro Amo.....	34
Figura 5.6. Resultados de validación cuenca C10: Linda Vista.	36
Figura 5.7. Resultados de validación cuenca C26: Subestación La Caja.....	36
Figura 5.8. Resultados de validación cuenca C29: Echeverría.....	37
Figura 5.9. Resultados de validación cuenca C24: Nuestro Amo.	37
Figura 5.10. Curvas de variación estacional para precipitación y temperatura de los 3 GCM en período de línea base (1985/86-2004/05).	38

Figura 5.11. Escenario 4.5. a) Proyección de temperatura media anual. b). Curva de variación estacional de temperatura futuro cercano y c). Curva de variación estacional de temperatura futuro lejano.	39
Figura 5.12. Escenario 8.5. a) Proyección de temperatura media anual. b). Curva de variación estacional de temperatura futuro cercano y c). Curva de variación estacional de temperatura futuro lejano.	40
Figura 5.13. Escenario 4.5 a) Proyección de precipitación media anual. b). Curva de variación estacional de precipitación, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de precipitación, futuro lejano.	42
Figura 5.14. Escenario 8.5 a) Proyección de precipitación media anual. b). Curva de variación estacional de precipitación, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de precipitación, futuro lejano.	43
Figura 5.15. Escenario 4.5. a) Proyección de caudal medio anual. b). Curva de variación estacional de caudal, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de caudal, futuro lejano.	45
Figura 5.16. Escenario 8.5. a) Proyección de caudal medio anual. b). Curva de variación estacional de caudal, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de caudal, futuro lejano.	46
Figura 5.17. Curva de variación estacional. Caudales simulados en período de línea base y observados.	47

Capítulo 1. Introducción

1.1. Generalidades

El recurso hídrico como tal, es una preocupación a nivel de toda la sociedad tanto en el ámbito nacional como internacional. Su escasez amenaza el desarrollo potencial al que podría aspirar una región, convirtiéndose en una limitante importante para que la población mantenga o mejore su bienestar. Esa preocupación aumenta producto de la multiplicidad de factores que explican el deterioro del recurso hídrico, tanto en calidad como en cantidad.

En los últimos 150 años se ha evidenciado un calentamiento del planeta a escala mundial. Según instancias internacionales encargadas de discutir y analizar el tema, como la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC o UNFCCC, siglas en inglés), este calentamiento ha sido de al menos 0,6°C desde finales del siglo XIX y representa una variación térmica que no tiene precedentes en miles de años (PNUMA & UNFCCC, 2004).

Los cambios climáticos por sí mismos representan una condición natural del planeta, con una historia de factores naturales que han alterado la composición y dinámica de la atmósfera provocando descensos y aumentos globales en la temperatura. Prueba de ello son los períodos fríos, conocidos como glaciaciones, alternados con períodos interglaciares. El Cambio Climático actual se diferencia de los fenómenos naturales en el sentido que está asociado a la influencia de las **actividades humanas** sobre las condiciones del sistema climático.

El Cambio Climático ha sido definido por la CMNUCC como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (ONU, 1992b).

En Costa Rica la precipitación anual promedio ronda los 3300 mm (3300 litros/m²), situación que es variable de acuerdo a cada una de las regiones del país. En términos generales, el volumen promedio de precipitación anual sobre cualquier región del país sobrepasa los 1200 mm, y hay sectores en los que se superan los 7000 mm (MINAE / PNMIRH, 2004).

Geográficamente el país está ubicado en la franja planetaria comprendida entre los paralelos Trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio, es decir, la región definida como Zona Intertropical. Esto le confiere características tropicales a su entorno ecológico: bosques, red hidrográfica, suelos y clima. La fauna y la flora que se adapta a estas condiciones, por lo tanto, éstas son de tipo tropical. El clima tropical del país es afectado por diferentes factores como el relieve (la disposición de las montañas, llanuras y mesetas), la situación con respecto al continente

(condición ístmica), la influencia oceánica (los vientos o las brisas marinas, la temperatura de las corrientes marinas) y la circulación general de la atmósfera (IGN 2005).

En lo referente a datos climáticos e hidrológicos, a escala mundial éstos empiezan a considerarse a partir de la era instrumental, es decir, aproximadamente a mediados del siglo XIX. Así las cosas, es aproximadamente a partir del año 1950 cuando se generan bases de datos más completas. Dichas mediciones son de vital importancia para la visión global de la variabilidad y los cambios a largo plazo de la atmosfera, los océanos, la superficie terrestre y todas sus implicaciones a nivel de disponibilidad de recurso hídrico que es en específico el tema que atañe a esta investigación.

En el informe del IPCC (2013) se indica *“cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850 (Figura 1.2). En el hemisferio norte, es probable que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1400 años (nivel de confianza medio).”*

La disponibilidad de agua dulce en el mundo es limitada y, además, existe una distribución desigual del recurso en las distintas superficies continentales, dando lugar a zonas de abundancia y zonas de escasez. Es por esta razón resulta sumamente importante e interesante llevar a cabo esta investigación para la determinación de escenarios que permitan conocer las tendencias climatológicas y de disponibilidad de recurso hídrico en Costa Rica.

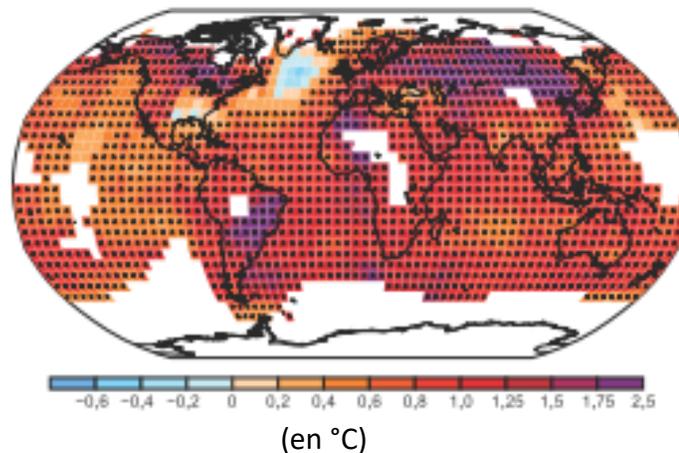


Figura 1.1. Cambio observado en la temperatura en superficie, 1901-2012.

Fuente: Informe IPCC, 2013. <http://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/climate-impacts-water-in-the-future-1.7897>

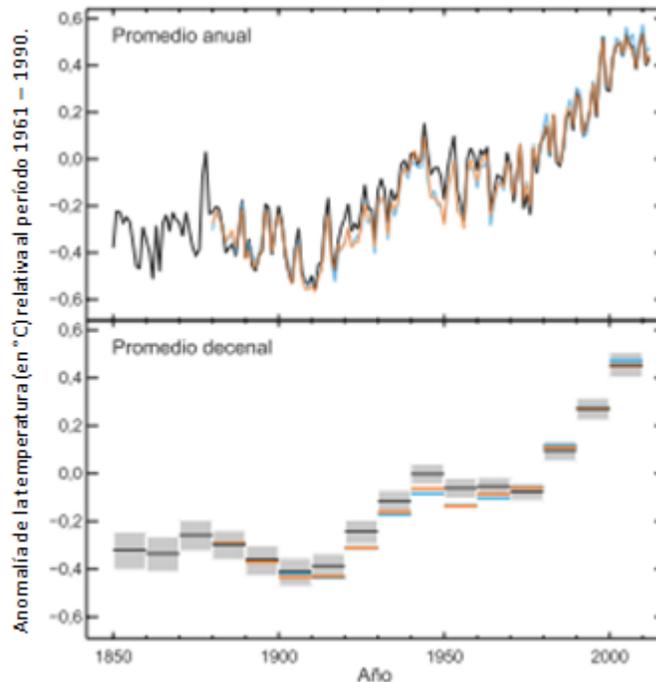


Figura 1.2. Anomalía observada en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas combinadas, 1850-2012.

Fuente: Informe IPCC, 2013. <http://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/climate-impacts-water-in-the-future-1.7897>.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es analizar la disponibilidad futura de recursos hídricos en las zonas altas de la provincia de Heredia, Costa Rica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar modelos de simulación hidrológica a escala regional aplicables a la zona de estudio.
- Seleccionar al menos tres modelos de circulación global para dos escenarios futuros de cambio climático.
- Analizar la incertidumbre asociada a las series de tiempo meteorológicas.
- Evaluar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos de la zona.

1.3. Organización del informe

En el capítulo 2 del presente informe se entregan algunos antecedentes recopilados en la literatura, relacionados con el cambio climático y sus efectos en los recursos hídricos, y con los

modelos estudiados. Mientras que el capítulo 3 se enfoca principalmente en la metodología empleada para el desarrollo de la presente investigación. Seguidamente, en el capítulo 4 se detalla la descripción de la zona de estudio, esto tomando en consideración aspectos físicos, geológicos, geomorfológicos, de tipo y uso de suelo. Así como aspectos climatológicos y fluviométricos importantes.

En el capítulo 5 se describen los procesos de implementación de cada componente de la modelación hidrológica, para lograr una adecuada calibración y validación de cada unidad hidrológica perteneciente al sistema de la cuenca del río Virilla. Posteriormente, en este mismo capítulo, se describen los escenarios de Cambio Climático en estudio y a su vez, la implementación de estos a través del modelo hidrológico específicamente sobre la región de interés.

Adicionalmente, se realiza la discusión de los resultados obtenidos durante el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico, así como el impacto del Cambio Climático en el recurso hídrico en la región.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones se exponen en el capítulo 6, donde se realiza un resumen de las ventajas y desventajas que puede tener el aplicar esta metodología para el análisis que motivó esta investigación desde sus inicios la utilidad de replicarlo en otras cuencas importantes del país y los principales hallazgos del proyecto.

Capítulo 2. Revisión bibliográfica

2.1. Modelación hidrológica

El proceso de modelación hidrológica se refiere a la obtención de series de tiempo de variables hidrológicas a partir de la combinación de una serie de parámetros y ecuaciones específicas que representan, de manera simplificada, un sistema real más complejo. La importancia de estos modelos radica en la simulación y predicción de fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo.

Las series de tiempo hidrometeorológicas serían datos asociados a variables del tipo: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, cobertura nubosa, caudal, etc. Dichas series presentan comportamientos como tendencia, estacionalidad y periodicidad.

En este caso particular, el modelo hidrológico que se aplicó para el desarrollo de este estudio está basado en procesos físicos, es decir, los procesos hidrológicos que ocurren en el sistema de incorporan de manera clara y explícita (Abbott *et al.*, 1986). Con frecuencia, los procesos incluidos en la modelación se asocian a parámetros y es sobre estos últimos que se realiza el proceso iterativo de calibración.

El modelo a utilizar es el "*Water Evaluation And Planning*" (WEAP), en el cual, los parámetros que intervienen en cada proceso de calibración cuenta con un significado físico específico.

La respuesta obtenida del proceso de modelación, debe ser evaluada tomando en cuenta una serie de criterios de eficiencia específicos donde se evidencie el desempeño del modelo tanto para representar las variables tanto durante sus condiciones "*peak*" como durante los valores más bajos de la misma (Moriassi *et al.*, 2007).

Con el pasar de los años y conforme se progresa en el desarrollo e implementación de modelos hidrológicos, la fidelidad de los resultados obtenidos están estrictamente relacionados con la función objetivo planteada, el algoritmo de optimización, la estructura del modelo y la calidad de la información que se emplee en la modelación (Gan *et al.*, 1996).

2.1.1. Modelo WEAP

El modelo hidrológico seleccionado para el desarrollo de este proyecto es el "*Water Evaluation And Planning*" (WEAP por sus siglas en inglés). Éste fue desarrollado por el "*Stockholm Environment Institute*" y constituye una herramienta computacional que se distingue por contar con un enfoque integral en lo que a planificación de los recursos hídricos se refiere debido a que

integra componentes para la planificación de recursos hídricos y el análisis de políticas del uso del agua.

Respecto al enfoque integral, es importante también recalcar que WEAP es capaz de simular sistemas de agua, tanto desde componentes naturales (ej. escorrentía, temperatura, etc.) como componentes humanos (ej. requisitos de riego, embalses, bombeo de agua subterránea, plantas hidroeléctricas, flujo base, entre otros), así las cosas, el modelo resulta en una herramienta eficaz para examinar opciones de desarrollo y manejo del agua.

Un aspecto de suma importancia en el desarrollo de esta investigación se refiere a la capacidad de análisis de escenarios, la cual es fundamental en WEAP, no porque el modelo sea capaz de identificar y separar cada caso por sí mismo sino porque permite un manejo ágil de los datos para realizar este análisis. La investigación a partir del planteamiento de escenarios se usa para explorar la respuesta del sistema hidrológico ante el fenómeno específico que se desea estudiar, en este caso en concreto se refiere al efecto del cambio climático las fuentes de agua. Por lo tanto, esta capacidad del sistema es otra característica importante y ventajosa que presenta este modelo para el desarrollo de este proyecto.

2.1.2. Forzantes del modelo hidrológico

Tal como se mencionó anteriormente, el modelo a utilizar es WEAP, el cual, trabaja sobre todo con variables de tipo meteorológicas, entre ellas: temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y la latitud. Adicionalmente, el programa es capaz de considerar los efectos de la nieve sobre el balance hídrico así que toma en cuenta la calibración de las respectivas temperaturas de derretimiento y congelamiento. No obstante, este proyecto se desarrolla en plena zona intertropical, por lo tanto, las cuencas en su totalidad son de régimen pluvial.

WEAP se caracteriza por ser un modelo conceptual semi-distribuido de base física donde cada cuenca es subdivida en bandas o unidades de respuesta hidrológica (URH).

Otra variable importante que se requiere para empezar con la modelación es la cobertura vegetal, así éste completa el cálculo de los componentes del balance para finalmente, a partir de la comparación entre la salida del modelo y la información fluviométrica disponible realizar la evaluación y la calibración del mismo.

La esquematización de los procesos que ocurren a lo interno del modelo se muestra en la Figura 2.1. Básicamente se trata de un balance a partir de una estructura de dos estanques, el primero representando la zona de raíces y el segundo la zona profunda.

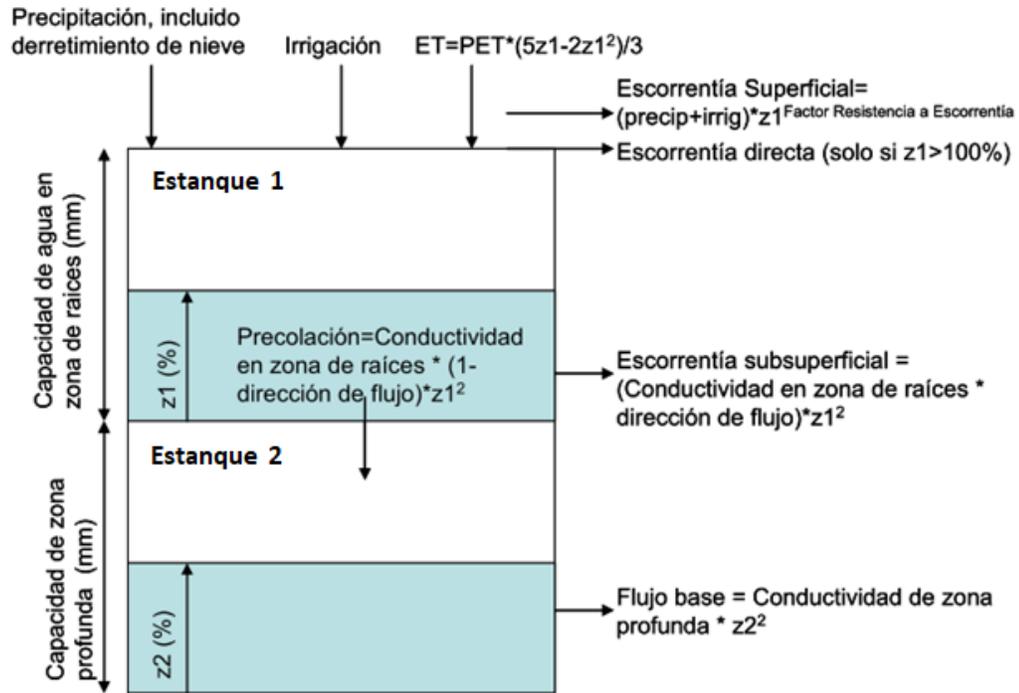


Figura 2.1. Elementos hidrológicos modelados en WEAP.
Fuente: Adaptado de Centro de Cambio Global, 2009.

Los procesos internos de los estanques superior e inferior son explicados a partir de la definición de las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

$$Sw_j \cdot \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) \cdot \frac{RRF_j}{z_{1,j}^2} - f_j \cdot k_s \cdot z_{1,j}^2 - (1 - f_j) \cdot k_s \cdot z_{1,j}^2$$

Ec. 2.1

$$Dw_j \cdot \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d \cdot z_{1,j}^2 - (1 - f_j) \cdot k_s \cdot z_{2,j}^2$$

Ec. 2.2

Donde,

Sw_j : Almacenamiento en zona de las raíces.

$z_{1,j}$: Nivel de humedad en la zona de las raíces.

P_e : Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves).

PET : Evapotranspiración potencial de cultivo, aproximada a partir del método de Penman – Montith.

$k_{c,j}$: Coeficiente de cultivo.

RRF_j : Índice de resistencia a la escorrentía.

f_j : Dirección preferencial del flujo.

k_s : Conductividad hidráulica en zona de las raíces.

Dw_j : Almacenamiento en la zona profunda.

$z_{2,j}$: Nivel de humedad en la zona profunda.

k_d : Conductividad hidráulica en zona profunda.

2.1.3. Criterios de eficiencia

Durante el proceso de calibración del modelo hidrológico generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base. Entonces, una vez que se cuente con los resultados de la calibración de caudales, estos se comparan con los registros históricos de estaciones fluviométricas de cada región.

El grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados puede llevarse a cabo a partir del cálculo de los siguientes estadísticos:

- **Razón de escorrentía superficial:**

$$\%BiasRR = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^N Q_{obs,i}} \cdot 100$$

Ec. 2.3

La razón de escorrentía superficial es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado con el total de escorrentía, cuantificando las diferencias en torno al equilibrio. Sus resultados oscilan entre $(-\infty, +\infty)$, donde 0% corresponde a la condición de equilibrio perfecto.

Valores positivos indican una subestimación de los valores modelados respecto a los observados y, por ende, valores negativos son indicativos de sobreestimación.

- **Coefficiente de Nash-Sutcliffe:**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Ec. 2.4

Este indicador oscila entre $(-\infty, 1)$ y su valor debe ser cercano a 1 para que la simulación represente de manera exacta la información observada.

El coeficiente NSE explica cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

Valores negativos indican que la media es un mejor predictor y un valor mayor a 0 implica que el modelo es mejor predictor que la media. Usualmente, un valor de 0.7 o más corresponde a una modelación adecuada (Moriasi *et al.*, 2007). Es decir, el coeficiente NSE establece la eficiencia del modelo para simular caudales comparando con la media como predictor de dicha variable.

- **Coefficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico:**

$$LNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(Q_{obs,i}) - \text{Log}(Q_{sim,i}))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(Q_{obs,i}) - \text{Log}(\overline{Q_{obs}}))^2}$$

Ec. 2.5

El coeficiente NSE tal y como se muestra en la Ec. 2.4 tiende a sobrevalorar las correspondencias entre caudales altos modelados y observados y subvalora las correspondencias entre caudales bajos. Por lo tanto, aplicar una transformación logarítmica en ambos sets de datos (simulados y observados), es una manera de neutralizar las deficiencias del primero.

- **Coeficiente R²:**

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}) \cdot (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2 \cdot (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}}$$

Ec. 2.6

El coeficiente R² o coeficiente de determinación representa una medida estadística del ajuste entre los valores observados y simulados. Indica entonces cuánto de la variación total de una variable (dependiente) es explicada por la otra variable (independiente). Es decir, mide la capacidad explicativa del modelo de regresión lineal aplicado.

- **Razón de desviación estándar de las observaciones (RSR):**

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}}$$

Ec. 2.7

El coeficiente conocido como RSR lo que implica es una estandarización del error cuadrático medio (RMSE) utilizando la desviación estándar de las observaciones.

Este índice incorpora los beneficios del índice de error estadístico e incluye un factor de normalización.

El valor óptimo de RSR que se puede obtener es 0 (cero), lo cual indica variación residual nula y consecuentemente la obtención de un modelo perfecto. Entre más pequeño sea el valor de RSR mejor va a ser el desempeño del modelo.

- **%BiasFMM (FCD median midflow):**

$$\%BiasFMM = \frac{\log(Q_{sim,med}) - \log(Q_{obs,med})}{\log(Q_{obs,med})} \cdot 100$$

Ec. 2.8

Corresponde al sesgo estadístico relacionado a las diferencias del rango medio de caudales, funcionando bajo la construcción de la curva de duración, extrayendo la información de la mediana estadística de ambas fuentes de datos.

2.2. Cambio Climático

Desde la primera década del siglo XX se han realizado numerosos estudios para poder caracterizar de buena forma el fenómeno denominado “Cambio Climático”, para lo cual se han creado una gran cantidad de modelos de circulación global de la atmósfera (GCM), recopilados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Para la elaboración del cuarto informe de cambio climático (AR4, 2007), el IPCC desarrolló escenarios caracterizados por las emisiones de gases de efecto invernadero, dados a su vez por diferentes proyecciones de aumento demográfico, tecnológico y económico, presentando 4 escenarios denominados SRES (Nakicenovic *et al.*, 2000).

Posteriormente, en el marco del quinto informe de cambio climático (AR5, 2013), se consideran nuevos escenarios, los que se dan por la evolución de las forzantes radiativas, y corresponden a “Earth System Models”, ya que consideran vegetación interactiva, ciclo de carbono y una mejor representación de química atmosférica, presentando 4 escenarios denominados RCP (Taylor *et al.*, 2012). Los escenarios considerados en éste modelo se obtienen por el valor de la forzante radiativa en el año 2100.

Los modelos de circulación general (GCM) a utilizar se descargaron de la plataforma NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections, <https://nex.nasa.gov/nex/>) de la NASA derivados en el marco del proyecto de Intercambio de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5).

Dicha plataforma incluye las proyecciones de RCP 4.5 y RCP 8.5 a escala diaria con resolución espacial de 0,25 grados (~ 25 km x 25 km) que contienen las siguientes variables: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para los períodos de 1950 al 2100.¹

En términos generales, las “Trayectorias Representativas de Concentración” (RCP por su sigla en inglés) a analizar indican que:

- RCP 4.5: la forzante de radiación [W/m^2] será de aproximadamente 4.5 una vez estabilizado después del año 2100. La concentración en ppm de CO_2 será de aproximadamente 650 equivalente con estabilización posterior al año 2100. Y finalmente el comportamiento se considera estable sin aumentos radicales.

¹ Información tomada de: <https://nex.nasa.gov/nex/>. Fecha: 20 de febrero del 2017, Hora: 13:45.

- RCP 8.5: la forzante de radiación [W/m^2] será mayor a 8.5 en el año 2100. La concentración en ppm de CO_2 será mayor de 1370 equivalente en año 2100. Y finalmente el comportamiento se considera en aumento.

Para llevar a cabo la estimación del impacto del cambio climático sobre el caudal de respuesta de las subcuencas en estudio, se toman en consideración las variables meteorológicas de precipitación y temperatura (máxima y mínima) provenientes de los modelos de circulación global que se van a utilizar. En concreto, se eligieron 3 modelos:

2.2.1. MPI-ESM²

Modelo desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología (MPI-M), que une la atmósfera, el océano y la superficie terrestre a través del intercambio de energía, impulso, agua y gases traza importantes como el dióxido de carbono. Los cambios y mejoras más importantes del MPI-ESM en comparación con el modelo anterior ECHAM5 / MPIOM son:

- Tratamiento avanzado / mejorado de la transferencia radiativa.
- Mejor representación del albedo de superficie.
- Representación nueva y mejorada del aerosol.
- Representación mucho mejor de la atmósfera media.
- Capacidad para simular en una gama de diferentes resoluciones dependiendo de la pregunta.
- Dinámica de vegetación interactiva.
- Ciclo de carbono acoplado.

2.2.2. CSIRO-Mk3-6-0

El modelo CSIRO-Mk3.6.0 es el resultado de la iniciativa de trabajo conjunta entre el Centro de Excelencia del Cambio Climático de Queensland y la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO).

La mejora más importante con respecto a su predecesor es la inclusión de un esquema de aerosol interactivo. Esto permite investigar las Impacto de una serie de agentes de aerosol sobre el clima (Collier, M.A., 2011).

² Información tomada de: <https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/> . Fecha: 20 de febrero del 2017, Hora: 17:05.

2.2.3. CCSM³

Este modelo surge de la iniciativa conjunta de dos organizaciones, la Fundación Nacional de Ciencia (National Science Foundation, NSF) y el Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (National Center for Atmospheric Research, NCAR). Además, colabora estrechamente con el Departamento de Energía de los Estados Unidos y la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio.

En relación con versiones anteriores, presenta mejoras en cuanto a resolución, menor huella de memoria y mejora en la escala de todos los componentes junto con una infraestructura totalmente nueva que permite mayor flexibilidad y extensibilidad.

³ Información tomada de: <http://www.cesm.ucar.edu/> . Fecha: Fecha: 21 de febrero del 2017, Hora: 11:05.

Capítulo 3. Metodología

3.1. Modelación hidrológica

El proceso de modelado y calibración de la zona de estudio se llevó a cabo básicamente siguiendo el esquema presentado en la Figura 3.1, donde el proceso 4 se realiza a partir de la iteración del modelo montado en WEAP. Cada una de las iteraciones en cuestión es almacenada y posteriormente analizada con el fin de verificar el comportamiento y avance del proceso de calibración hasta tanto se obtengan los mejores valores de eficiencia posibles de acuerdo a los criterios planteados en la sección 2.1.3.

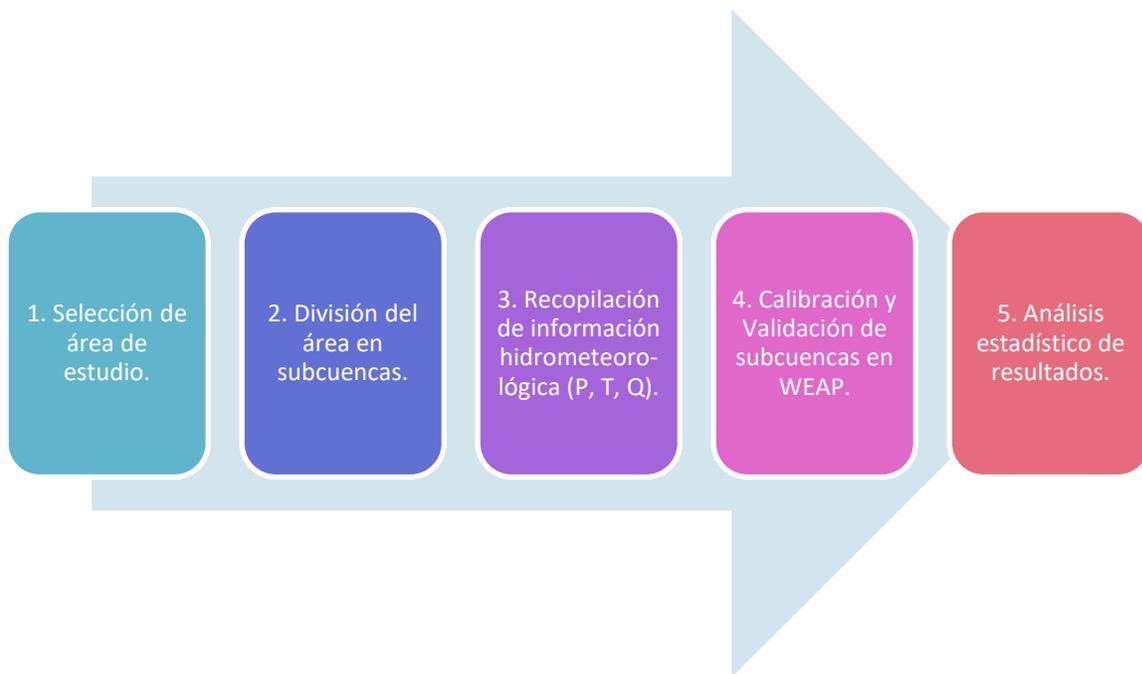


Figura 3.1. Estructura metodológica básica de modelación hidrológica.

La modelación se llevó a cabo a escala mensual y para cada variable se contó con distintas extensiones de registro, los cuales se detallan en el siguiente capítulo. Además, mencionar que la simulación se realizó para las subcuencas en régimen natural.

La distribución espacial de las variables se llevó a cabo a partir del trazado de polígonos de Thiessen, los cuales, según la variable y la disponibilidad de las mediciones, se muestran en el siguiente capítulo. De manera adicional, para el empleo del modelo WEAP se subdividió el territorio en bandas de elevación (Figura 4.5). La separación en subcuencas para la realización de la calibración del modelo hidrológico se muestra en la Figura 5.1.

El producto final del proceso de calibración resulta en una serie de parámetros característicos para cada subcuenca, los cuales logran representar satisfactoriamente la secuencia de caudales observados en cada una de las estaciones de control. Dichos parámetros se consideran válidos para el futuro, lo cual permite realizar la simulación de los escenarios concernientes al análisis de Cambio Climático (CC).

3.2. Cambio Climático

Para la correcta representación de los fenómenos climatológicos de un lugar a partir de escenarios de Cambio Climático es necesario realizar el escalamiento de cada GCM. Para el desarrollo de este proyecto, se plantea de manera inicial el escalamiento estadístico que ha sido ampliamente utilizado en la hidrología por gran cantidad de investigadores del tema (Li *et al.*, 2010 y Perkins, 2011).

El escalamiento estadístico mencionado consta de dos partes, la primera de ellas corresponde al escalamiento espacial, el cual consiste en que para cada una de las estaciones de precipitación y temperatura empleadas y a partir de un criterio de distancia entre las coordenadas de dichas estaciones y los modelos GCM (NASA-NEX); en este caso particular el criterio es el inverso de la distancia. El segundo escalamiento a realizar corresponde al temporal o corrección de sesgo, donde se realiza la comparación de las curvas de duración con base en el registro histórico de la estación (1984/85-2004/05) y los resultados del proceso de escalamiento espacial.

Las funciones obtenidas a raíz de dicha comparación se conocen como funciones de transferencia (FT), dichas funciones se consideran válidas para el futuro, permitiendo así el desarrollo y análisis de escenarios de proyecciones de precipitación, temperatura y caudales según corresponda para cada GCM.

Las proyecciones de CC comprende dos escenarios de futuro, el primero de ellos alcanza los años hidrológicos del 2015/2016 al 2044/45 (futuro cercano) y el segundo abarca el período comprendido entre los años hidrológicos 2045/46 al 2074/75 (futuro lejano) y una línea base (LB) que comprende de 1984/85 al 2004/05.

Capítulo 4. Descripción de la zona de estudio

4.1. Antecedentes

Costa Rica es uno de los países que integran Centroamérica. Tiene una superficie de 51100 km² y limita al norte con Nicaragua, al sureste con Panamá, al este con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 4.1).

Costa Rica es un país muy montañoso con varios cerros de más de 3000 m.s.n.m., entre ellos el volcán Irazú. El punto más alto de Costa Rica es el Cerro Chirripó con 3821 m.s.n.m. ubicado en la Cordillera de Talamanca.

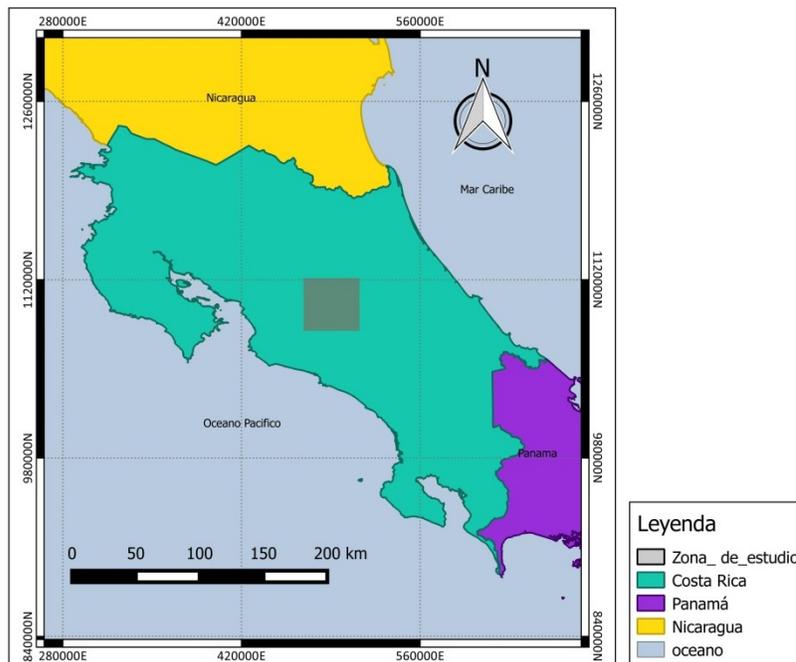


Figura 4.1. Ubicación zona de estudio.

El país se encuentra políticamente dividido en siete provincias que son: Guanacaste, Limón, Puntarenas, Heredia, Cartago, Alajuela y San José. Estas últimas cuatro le dan nombres a las principales ciudades que conforman además el Gran Área Metropolitana.

El país cuenta con 34 cuencas hidrográficas, ubicadas en tres vertientes: Caribe, Norte y Pacífico. En la vertiente del Pacífico se encuentra la cuenca del río Grande de Tárcoles, que se considera de primordial importancia por proveer de agua a tres cabeceras de provincia y en la que se agrupan 35 de los 81 municipios existentes a nivel nacional, en una extensión territorial del 4,15% y una concentración de población del 63% de los habitantes.

La cuenca del río Grande de Tárcoles (C24) está conformada por tres subcuencas de los ríos Virilla, Grande y Grande de Tárcoles (Figura 4.2) caracterizadas especialmente por ser zonas de

desarrollo urbano e industrial. La cuenca desemboca en el océano Pacífico, característica por la cual es posible definirla como una superficie de naturaleza exorreica.

En este caso específico se estudia la cuenca del río Virilla, afluente del río Grande de Tárcoles, a la altura de la estación Nuestro Amo (Código de estación: 24). Esta última representa, según delimitación oficial, el 80% de la cuenca total del río Virilla aproximadamente.

En adelante, en código que representa la cuenca en estudio es C24_24, debido a que pertenece al sistema de cuencas denominado C24 a la altura de la estación 24.

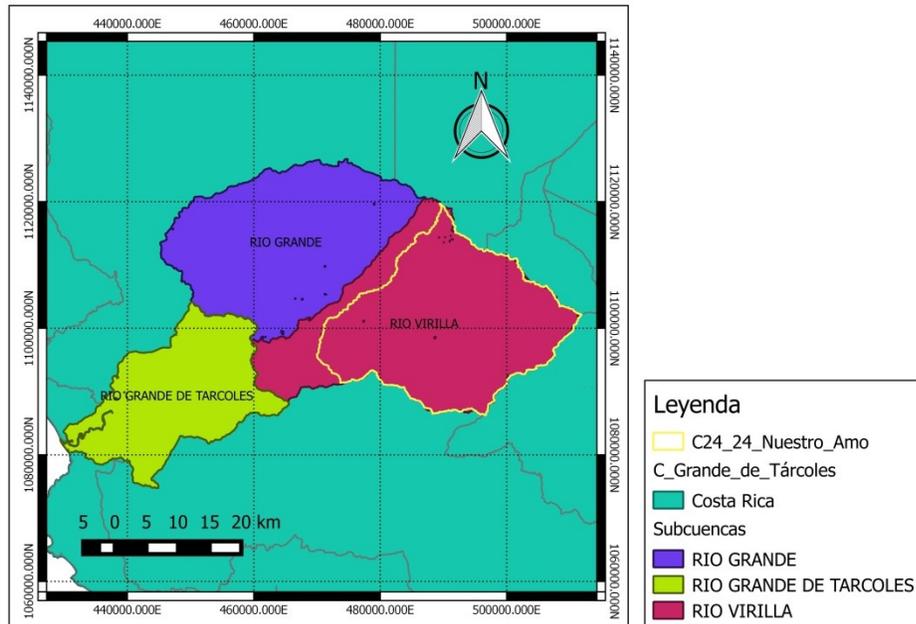


Figura 4.2. Cuenca del río Grande de Tárcoles.

4.2. Cuenca del río Virilla

El área de estudio se sitúa en la zona noroccidental del Gran Área Metropolitana (GAM). Limita al norte con las estribaciones del volcán Barva, al este con el Paso de la Palma (entre los volcanes Barva e Irazú), al sur con los cerros del Alto Tablazo. El límite restante (oeste) está determinado por el río Virilla que define a su vez la división administrativa de los cantones de Alajuela y Mora pertenecientes a las provincias de Alajuela y San José respectivamente.

El área pertenece al sistema hidrográfico de la Vertiente del Pacífico, donde en términos generales, se estima que el rango de precipitación media varía entre 1664 y 5282 mm. Diversos estudios han coincidido en que al menos un 70% de la población se asienta en la vertiente Pacífica, que es la vertiente más seca (GWP *et al.*, 2011).

Dicha vertiente se caracteriza principalmente por poseer dos estaciones climáticas bien definidas. En el caso particular de la cuenca del río Virilla, según se observa en la Figura 4.3, presenta una estación lluviosa, que se extiende aproximadamente de mayo a setiembre, siendo los meses de septiembre y octubre los que presentan la máxima precipitación y noviembre el mes de transición; otra es la estación seca, que se extiende de diciembre a marzo pues el mes de abril es considerado de transición. El mes más seco y cálido es marzo.

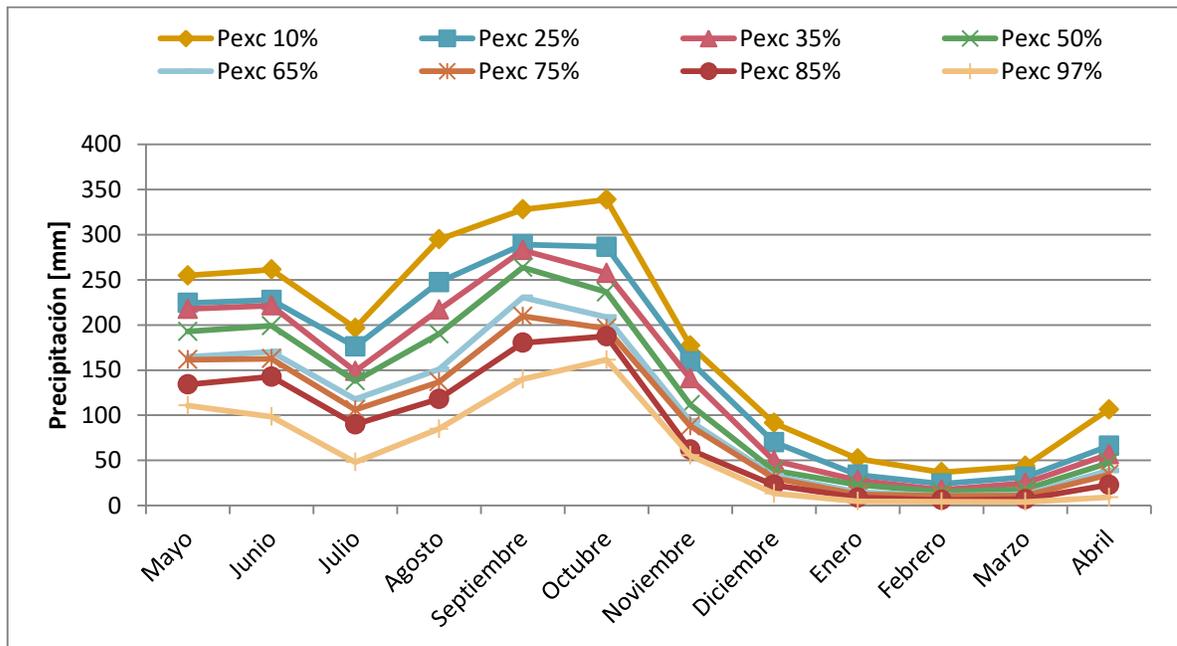


Figura 4.3. Curva de variación estacional. Cuenca del río Virilla a la altura de la estación Nuestro Amo.

Durante la época lluviosa, se presenta una relativa disminución de la cantidad de lluvia en los meses de julio y septiembre (veranillo o canícula) al intensificarse la fuerza de los vientos alisios. En contraposición, los meses más lluviosos son los de agosto y septiembre debido a la influencia de los sistemas ciclónicos y vientos monzónicos provenientes del océano Pacífico aunado al efecto de las barreras orográficas (Muñoz *et al*, 2002).

4.2.1. Información hidrometeorológica disponible

Para realizar el estudio se cuenta con información de 22 estaciones meteorológicas y 4 estaciones fluviométricas, el detalle de ubicación y distribución se observa en la Figura 4.4.

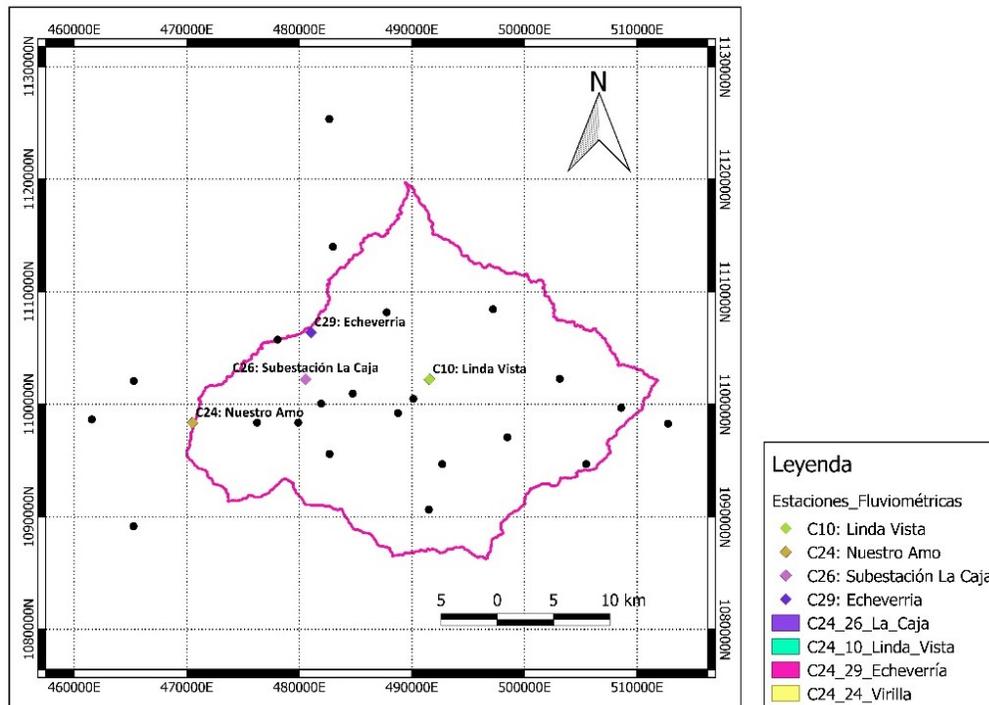


Figura 4.4. Distribución de estaciones meteorológicas y fluviométricas.

Específicamente de las 22 estaciones meteorológicas se extraen las variables precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y duración real de la insolación (n) a escala mensual. El detalle de las estaciones se muestra en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Estaciones hidrometeorológicas y fluviométricas utilizadas

Estación	Altitud [m.s.n.m.]	Coordenada Este [CRTM-05]	Coordenada Norte [CRTM-05]	VARIABLES registradas
Lornessa, Santa Ana	909	479897	1098377	Tmín, Tmáx, Pp.
Turrucares	639	465281	1102074	Tmín, Tmáx.
Rancho Redondo	1780	503137	1102273	Tmín, Tmáx, Pp.
Hacienda La Laguna, Curridabat	1240	498477	1097081	Pp.
Aeropuerto Juan Santamaría	932	478074	1105751	HR, Veloc. Viento, Tmín, Tmáx, Pp.
Desamparados	1162	492689	1094685	Pp.
Hacienda Ojo De Agua	850	476242	1098379	Pp.
Alto de Ochoмого	1546	505483	1094685	Tmín, Tmáx, Pp.
San Josecito De Heredia	1450	497199	1108448	HR, Veloc. Viento, Tmín, Tmáx, Pp.
Aeropuerto Pavas	997	484741	1100955	HR, Veloc. Viento, n, Tmín, Tmáx, Pp.
Santa Lucia, Heredia	1200	487759	1108173	HR, Tmín, Tmáx, Pp.

Finca 3, Llano Grande (La Laguna)	2220	508589	1099693	HR, n, Tmín, Tmáx, Pp.
Puriscal	1102	465268	1089171	Tmín, Tmáx.
Sanatorio Duran	2345	512757	1098288	Pp.
Santo Domingo del Roble	1430	482984	1114002	Pp.
Subestación La Caja	1000	481939	1100062	Pp.
Sabana Norte	1129	488754	1099223	HR, Veloc. Viento, Pp.
Salitrillos De Aserri	1381	491506	1090648	Pp.
Cerro Escazú	1500	482681	1095587	Pp.
Colima	1145	490125	1100494	HR, Veloc. Viento, Pp.
Garita Embalse	484	461564	1098661	Veloc. Viento.
Vara Blanca	1773	482664	1125351	Veloc. Viento.
C29: Echeverría	950	481424	1106022	Caudal
C24: Nuestro Amo	556	470577	1098626	Caudal
C10: Linda Vista	1085,5	491594	1102209	Caudal
C26: Subestación La Caja	870	480630	1102213	Caudal

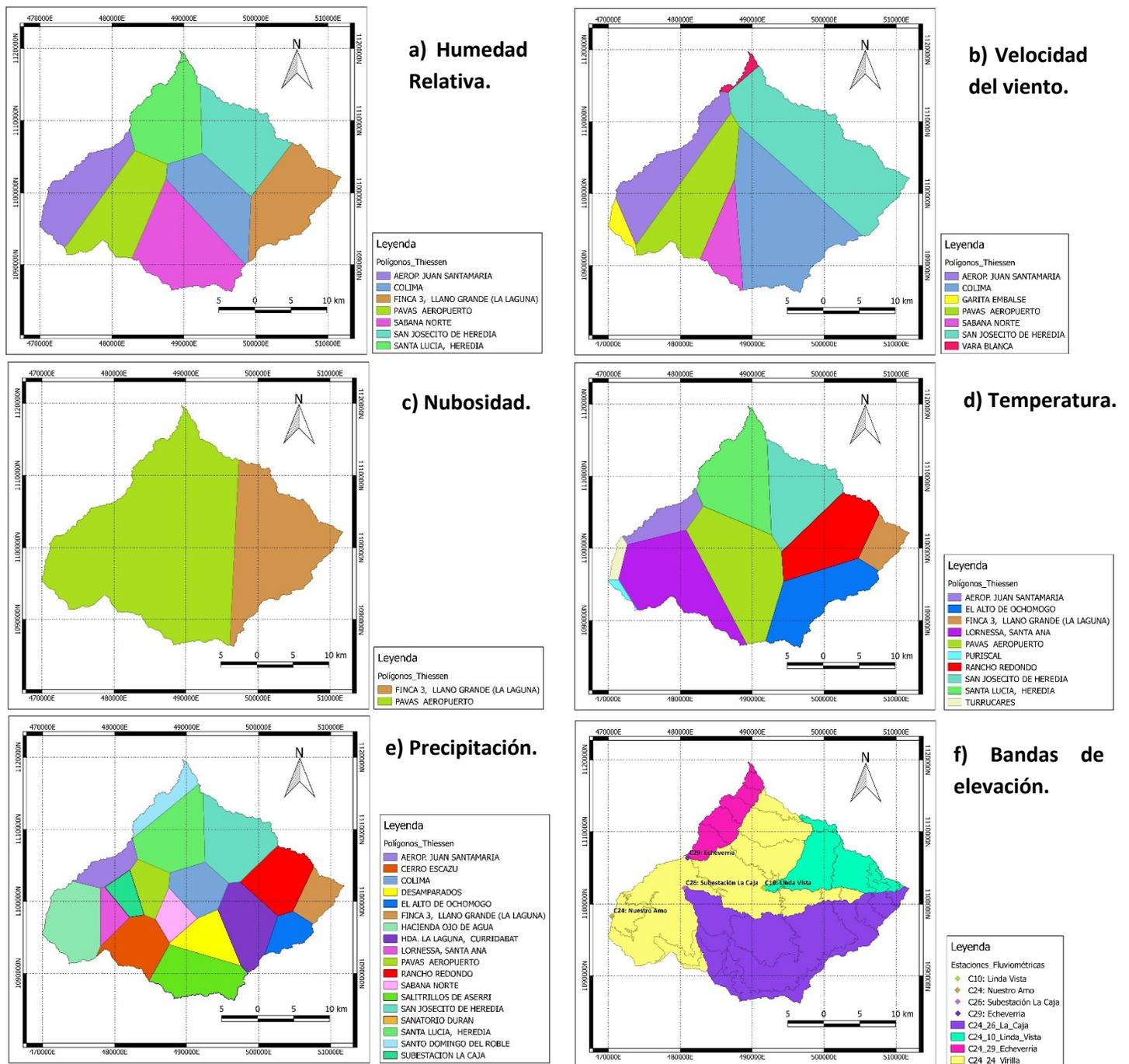
En detalle, se cuenta con registros medios mensuales de las variables mencionadas que se extienden desde mayo 1970 hasta abril 2016, las cuales estadísticamente se comportan según se muestra en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Promedio y desviación estándar de variables meteorológicas de la cuenca del río Virilla en la estación Nuestro Amo para el período 1984/85 – 2004/05.

Mes	Humedad relativa [%]		Nubosidad [n/N]		Velocidad del viento [m/s]	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
Enero	81,6	2,3	9,2	0,6	3,0	0,4
Febrero	83,3	2,1	9,2	0,6	2,9	0,5
Marzo	80,0	2,3	9,0	0,7	4,0	0,4
Abril	75,4	3,0	7,5	0,7	5,2	0,9
Mayo	72,6	2,1	5,2	0,5	5,9	0,6
Junio	70,9	2,6	4,0	0,4	5,7	0,7
Julio	70,3	1,7	4,1	0,4	4,9	0,7
Agosto	72,1	3,1	4,4	0,6	4,2	0,8
Septiembre	78,6	3,0	4,4	0,4	3,4	0,6
Octubre	80,7	2,0	4,7	0,6	2,9	0,4
Noviembre	78,0	2,4	5,3	0,8	3,8	0,6
Diciembre	78,9	2,2	7,3	0,9	3,5	0,6

Además, tal y como se mencionó con anterioridad, se confeccionaron polígonos de Thiessen a partir de los cuales se realizó la distribución espacial de los datos meteorológicos y bandas de

elevación para la discretización de la cuenca en el proceso de calibración del modelo hidrológico. Dichas bandas con diferencias de 300 metros de elevación y considerando además el tipo de cobertura mostrada. (Figura 4.5).



Aunque el período de las series meteorológicas es extenso, no se cuenta con la misma cantidad de datos a nivel de fluviométrico. En este caso particular la información es discontinua, por lo

tanto, en cada una de las subcuencas se identificaron dos períodos continuos de datos donde uno de ellos será utilizado para la calibración del modelo hidrológicos y consecuentemente el segundo para la validación del mismo. El detalle de los periodos en mención se muestra en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Longitud de registro completo de datos de caudal por cuenca.

Cuenca	Registro
C24_10: Linda Vista	May-70 – Abr-85 / May-85 – Abr-89
C24_26: Subestación La Caja	May-70 – Abr-88 / May-90 – Abr-03
C24_29: Echeverría	May-91 – Abr-96 / May-04 – Abr-16
C24_24: Nuestro Amo	May-81 – Abr-06 / May-09 – Abr-16

4.2.2. Características físicas y morfométricas

En lo referente a cuencas hidrográficas, es importante recordar que la forma que esta tenga juega un papel predominante en la respuesta ante distintos eventos de precipitación.

La cuenca del río Virilla a la altura de la estación Nuestro Amo, tiene un área de 739,1 km², y por esto la misma se clasifica como intermedia – grande. La superficie además cuenta con un rango de elevación que se encuentra entre los 568 y los 3016 m.s.n.m. (Figura 4.6, Cuadro 4.4) y una pendiente media del 19%, lo cual indica que se trata de un terreno fuertemente accidentado. El cauce principal tiene una pendiente de 4,25% la cual es clasificada como suave. Lo anterior de acuerdo a la información obtenida del sensor SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”).

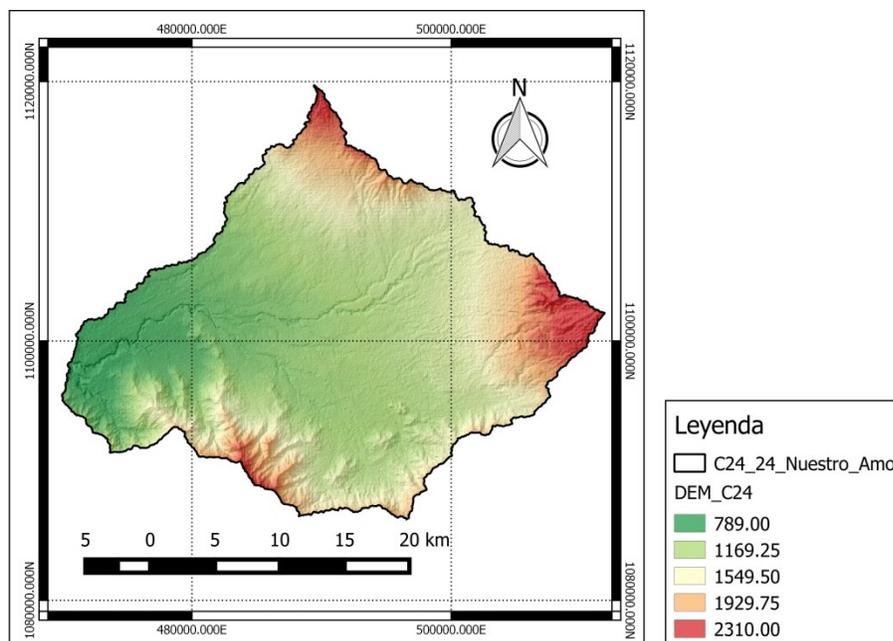


Figura 4.6. Modelo de elevación digital. Cuenca Río Virilla (C24_24).

Cuadro 4.4. Elevación.

Elevación mínima (m.s.n.m)	568
Elevación media (m.s.n.m)	1353,5
Elevación máxima (m.s.n.m)	3016

La función hipsométrica es una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación. La forma que esta adopte, de acuerdo a los datos de la zona en estudio, evidencia la edad geológica de la cuenca. La forma de la curva mostrada en la Figura 4.7 evidencia que se trata de una cuenca de valle o planicie pues dicha forma es característica de cuencas erosionadas donde aproximadamente el 60% de la superficie del terreno se encuentra por debajo de los 1353,5 m.s.n.m. (Strahler, 1952 y Racca, 2007).

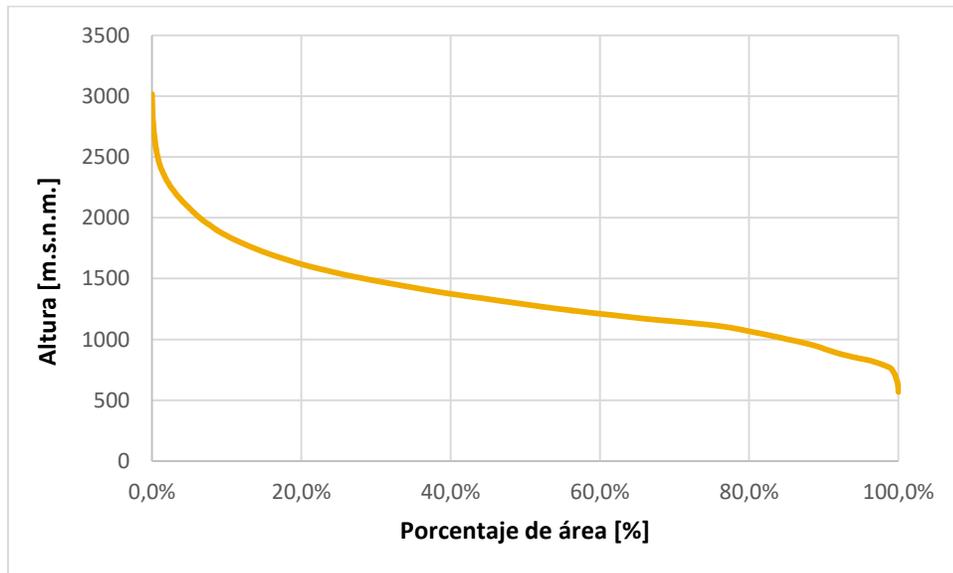


Figura 4.7. Curva hipsométrica. Cuenca del río Virilla.

En términos generales, la forma de la cuenca es de gran importancia pues tiene relación directa con el tiempo de concentración (T_c), el cual es el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la cuenca contribuya al cauce principal en estudio, es decir, el tiempo que toma el agua precipitada en los límites más extremos de la cuenca para llegar al punto de salida de la misma.

Además de los parámetros geométricos básicos, se cuenta con una serie de índices que ayudan a definir de mejor manera las características morfológicas de una cuenca. Así entonces, en el Cuadro 4.5 se resumen las principales características de la región en estudio.

Los valores de factor de forma de Horton e índice de compacidad (Cuadro 4.5) mostrados indican que se trata de una cuenca que no es ni alargada ni ensanchada.

Cuadro 4.5. Parámetros de forma.

Área de la cuenca (km ²)	739,1
Perímetro (km)	151,7
Longitud del cauce principal (km)	45,6
Índice de Compacidad de Gravellius, K_c	1,6
Factor de forma de Horton, R_f	0,4

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante grandes cantidades de precipitación, a mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, un menor tiempo al “peak” del hidrograma (Pérez, 1979). En este caso en particular la cuenca posee una densidad moderada (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Parámetros red de drenaje.

Número de orden, N_i	5
Densidad de drenaje, D_d (km/km ²)	1,4

4.2.3. Características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas

La zona donde se encuentra la cuenca del río Virilla está geológicamente constituida por rocas de tipo sedimentario y volcánico, definidas las primeras por la Formación Pacacua, considerado el basamento de la región de estudio y las segundas por las formaciones Colima, Tiribí y Barva (aunque los nombres estratigráficos correspondientes son Lavas Intracañón, Avalancha Ardiente y Barva), con una cobertura compuesta por tobas, lahares y cenizas (Schosinsky & Vargas, 2001).

La Formación Pacacua, por su amplia proporción arcillosa y baja permeabilidad se considera el basamento de la región. Se encuentra básicamente constituido por un conglomerado muy meteorizado y en ocasiones muy fracturado de color rojizo a morado (Schosinsky & Vargas, 2001).

Las principal unidad hidrogeológica es la Formación Colima donde los flujos de ignimbrita, los horizontes de toba y los depósitos laháricos constituyen acuitardos, aunque en algunos sectores presentan conductividades hidráulicas ($0,06 - 4,7 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$) que favorecen la transmisión de agua subterránea. Está compuesta por dos unidades que se denominan Colima Inferior y Colima Superior. La unidad Colima Inferior tiene un espesor promedio de 17 metros mientras que la unidad Superior tiene una profundidad promedio de 45 metros y las unidades se encuentran separadas entre ellas por una capa de toba de espesor variable.

Cuadro 4.7. Características de las unidades hidrogeológicas Colima Inferior y Colima Superior.

Colima Inferior	Colima Superior
<ul style="list-style-type: none"> • Lava de textura porfirítica muy vesicular y fracturada de color negro con una permeabilidad aparente muy alta. • Sobreyacida por una capa de toba y de ignimbrita de permeabilidad baja. • La toba es de color café muy heterogénea con tramos arenosos o arcillosos y con bloques volcánicos de tamaño centimétrico. La permeabilidad aparente es de baja a muy baja. • La ignimbrita presenta en ocasiones una moderada conductividad hidráulica. Está infrayacida por sedimentos marinos de la Formación Pacacua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lava andesítica de color café a grisáceo, densa pero con secciones vesiculares de gran porosidad. • En las secciones densas existe una fracturación que genera una porosidad aceptable. • El techo aparece una autobrecha compuesta por fragmentos de lava densa o lava vesicular mezclada con material terroso calcinado de color rojo.

Fuente: Schosinsky & Vargas, 2001.

Por su parte, la formación Tiribí está constituida por ignimbritas y tobas con un espesor promedio de 30 metros. La ignimbrita es de color gris constituida de fragmentos piroclásticos de tamaño lapilli en una matriz de ceniza, con grandes bombas de escoria negra y vidriosa. En ocasiones presenta fracturación prismática vertical lo cual favorece la percolación de agua hacia niveles más profundos. La toba tiene un color pardo a gris con predominancia de lapilli incluidos en una matriz de ceniza con escasa porosidad (Denyer & Arias, 1991).

La formación Peña Negra es de ambiente sedimentario y está compuesta por una sucesión de lutitas negras silíceas y areniscas medias de color café claro a amarillento (cuando se encuentran alteradas). Las lutitas mencionadas, microscópicamente corresponden con lodolitas, granos de cuarzo, plagioclasas, piroxenos, óxidos de hierro, ortosa y clastos volcánicos que flotan en una matriz arcillosa.

La facie arenosa se constituye de areniscas color café claro cuando no están meteorizadas. Se encuentran estratificadas, sin estructuras sedimentarias visibles, microgranulares, porosas y deleznales (Hernández, 1994).

Los lahares y arcillas son de color café, compuestos por fragmentos de lava alterados de tamaño mediano (1 – 2 cm) y ocasionalmente del tamaño bloque y partículas piroclásticas de granulometría arenosa a limosa, todo incluido en una matriz arcillificada densa de plasticidad

variable. En ocasiones se observan partículas de vidrio negro y de feldespatos. El espesor aparente alcanza 30 metros y se consideran de baja permeabilidad (Schosinsky & Vargas, 2001).

Las características geológicas de cada una de las formaciones que aparecen en la Figura 4.8 se explican en detalle en el Cuadro 4.8 que se muestra a continuación.

Cuadro 4.8. Detalle de clasificación geológica.

Símbolo	Formación	Tipo de roca	Edad	Descripción
Qv	Volcánica reciente	Duras		Materiales volcánicos: lavas, tobas, piroclásticos.
Qal	Aluvial cuaternaria	Inconsolidado	Holoceno	Depósitos aluviales, coluviales y sistemas costeros.
Tm-p	Formación Pacacua	Suaves	Mioceno inferior – Mioceno medio	Areniscas finas a guijarrosas, tobas, unidad brechas verdes coyolar.
Tm-pn	Formación Peña Negra	Suaves	Mioceno medio	Areniscas medias a finas (200m), lutitas y areniscas finas negras (700m)
Tm-c	Formación Coris	Suaves	Mioceno medio – Mioceno superior	Secuencia de ortocuarcitas en capas gruesas con intercalaciones de tobas
Tmp-ce	Cornubianitas de Escazú	Duras	Mioceno – Plioceno	Corneanas producto del metamorfismo de contacto del intrusivo de Escazú
Tmp-e	Intrusivo de Escazú	Duras	Mioceno – Plioceno	Monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas gabros y sienita.

Fuente: Denyer & Arias, 1990/1991 e Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014.

La formación Cornubianitas de Escazú se refiere a productos del metamorfismo de las lutitas de la formación Peña Negra que cuenta con un espesor aproximado de 200 metros. Son característicamente duras con fractura concoidea. Se determinan por la presencia de minerales de alternación, es decir, sericita, calcita, muscovita, ceolitas y minerales esenciales fuertemente alterados.

Finalmente, los depósitos aluviales están constituidos por bloques de lavas andesíticas, intrusivos y corneanas, sueltos, cementados o inconsolidados, bien redondeados y poco meteorizados. Mientras que los depósitos coluviales están formados por materiales sedimentarios, ígneos y metamorfizados que son caracterizados por la presencia de bloques densos y duros de rocas intrusivas y cornubianitas que están incluidos en una matriz arcillosa y en ocasiones arenosa (Hernández, 1994).

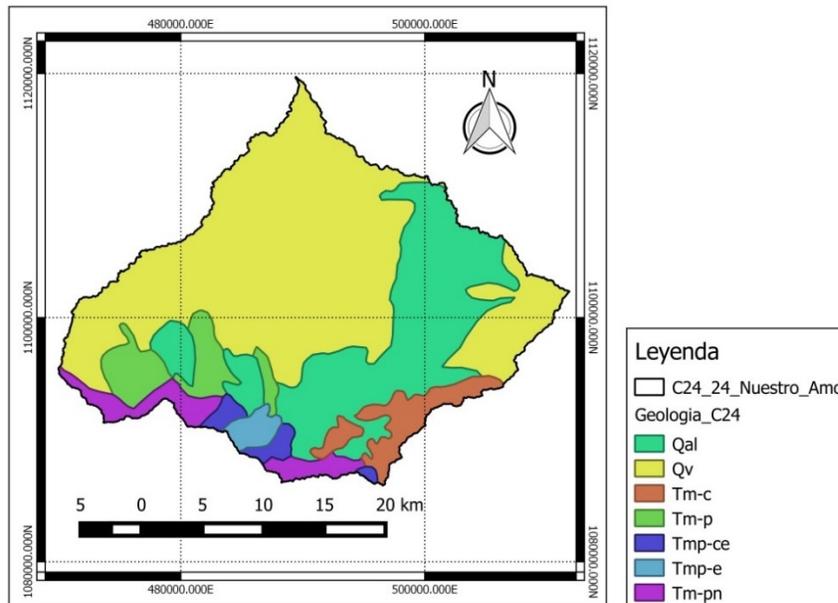


Figura 4.8. Clasificación geológica. Cuenca río Virilla.

Fuente: Denyer & Arias, 1990/1991 e Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014.

4.2.4. Suelo

4.2.4.1. Tipo de suelo

En la Figura 4.9 se detalla la clasificación obtenida para la cuenca del río Virilla definida a la altura de la estación Nuestro Amo, con el fin de conocer detalladamente el tipo de suelo presente en la región y sus características principales, tales como permeabilidad, origen. De acuerdo a la simbología mostrada en la figura, el detalle y características principales de los suelos presentes en la cuenca en estudio se muestra a continuación:

- **Suelos arcillosos de alto potencial de expansión (símbolo “Arc”)**

Esos suelos están asociados con los *Vertisoles* de la taxonomía de suelos. En el ámbito ingenieril se les conoce como *zonzocuitles* o “barro de olla”.

Superficialmente presentan un estrato de arcilla color negro de muy alto potencial de expansión, de al menos 60 cm de espesor usualmente subyacente por un estrato de arcilla gris, también con gran capacidad de expandirse. En ambos tipos de arcilla, el contenido de montmorillonita es lo suficientemente elevado como para darle al suelo una consistencia pegajosa cuando está húmedo (alta adherencia), y para agrietarlo cuando se seca durante el verano.

Este tipo de suelo sólo puede presentarse en zonas con un clima de estacionalidad bien definida, ya que los ciclos de humedecimiento – secado – agrietamiento son básicos para su

desarrollo, por lo que se encuentran en la Vertiente Pacífica y en algunas zonas del Valle Central de Costa Rica. Son suelos de topografías muy planas, lo que dificulta su drenaje y a la vez favorece su desarrollo.

Se puede puntualizar además que se trata de suelos sumamente impermeables, y con un alto potencial de expansión (arcillas).

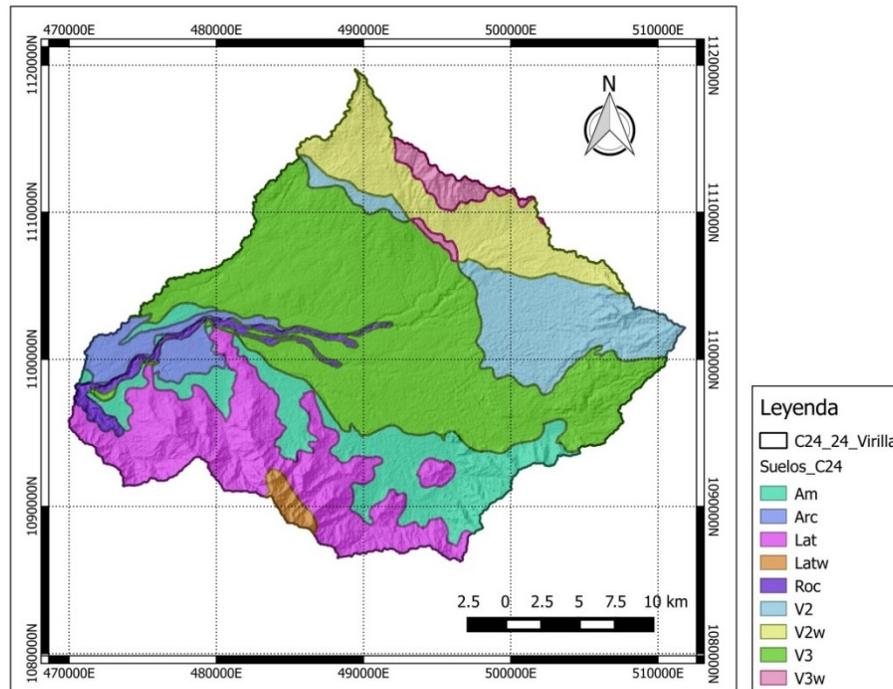


Figura 4.9. Tipos de suelo. Cuenca río Virilla.

Fuente: Bogantes *et al*, 1996.

- **Suelos de poco espesor (símbolo “Roc”)**

Son suelos poco desarrollados por la existencia de un material resistente a poca profundidad, usualmente menos de 60 cm. El desarrollo de estos suelos se ve limitado por dos factores principales: en primer lugar, si el suelo se ubica en fuertes pendientes, los procesos de erosión superan los de formación del suelo, y no pueden desarrollar espesores importantes. En este caso, el suelo presenta un color rojizo, signo de que la roca subyacente se encuentra muy meteorizada. En segundo lugar, en muchos aluviones se presentan gran cantidad de bloques resistentes a la meteorización, con lo que el suelo tampoco se puede desarrollar, aunque se ubique sobre topografía plana.

En este caso particular, se ubican principalmente sobre aluviones en zonas planas (Figura 4.9), el suelo se caracteriza por la gran cantidad de bloques, lo que puede dificultar su excavación. Su permeabilidad es alta, ya que estos aluviones no están cementados y usualmente contienen cantidades apreciables de materiales limosos y arenosos, que le confieren una buena permeabilidad.

- **Suelos volcánicos (símbolos “V1”, “V2”, “V3”)**

Son suelos derivados principalmente de cenizas volcánicas y de la meteorización de rocas volcánicas, y el contenido de estas cenizas y su grado de alteración es lo que determina en gran medida sus características.

Se debe tomar en consideración, que todos los suelos de origen volcánico presentan en menor o mayor grado las siguientes características:

- Estructura porosa y altas relaciones de vacíos, producto del transporte aéreo de la ceniza volcánica. En algunos suelos, esta estructura es inestable y puede colapsar por saturación.
- Alta humedad natural.
- En general, son suelos muy permeables.

V2 (Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amorfos): tienen un contenido de arena superior al 30%, estructura muy porosa y cambian drásticamente sus propiedades de plasticidad al secarse, por su alto contenido de alofana y otros minerales amorfos. La experiencia en el Valle Central, muestran que estos suelos son profundos, blandos y con estructura colapsable ante una eventual saturación del terreno.

V3 (Suelos residuales de origen volcánico): Estos suelos se ubican inmediatamente después de los V2, alejándose del foco de emisión de cenizas (cráter). Son los suelos en los que se cimientan la mayor parte de las estructuras del Valle Central, incluyendo las ciudades de Alajuela, Heredia y San José. Su contenido de arena es de alrededor de un 20%, y generalmente son del tipo MH o ML según clasificación SUCS. Son suelos en general blandos, de buena permeabilidad con minerales arcillosos como la halloisita, alofana y caolinita. En condiciones de saturación o de alta humedad permanente, las cenizas volcánicas contenidas en estos suelos meteorizan en arcillas grises de alto potencial de expansión, este es el origen de las arcillas grises del sur de la ciudad de San José, así como en ciertas zonas de Alajuela y Desamparados.

En algunos sitios, estos suelos pueden presentar comportamiento colapsable, aunque en menor grado que los suelos del tipo V2.

- **Suelos residuales rojizos (símbolo “Lat”)**

Son suelos residuales de color rojizo y gran desarrollo, lo que se traduce en un espesor de la capa de suelo con un espesor superior a los 2m. Se encuentran extendidos a lo largo y ancho del país, y pueden desarrollarse prácticamente a partir de cualquier roca madre y en cualquier clima. Los óxidos de hierro le confieren la coloración, y mineralógicamente predominan los minerales arcillosos caoliníticos, con la presencia de halloisita ocasionalmente. Son arcillas

limosas de alta plasticidad (generalmente MH), con límites líquidos superiores al 70%. Usualmente contienen más del 65% de arcilla caolinítica en su granulometría.

- **Suelos residuales de color amarillento (símbolo "Am")**

Son suelos del orden de los entisoles, son suelos pardo – amarillentos se caracterizan por estar permanentemente húmedos durante todo el año, lo cual les confiere el color pardo amarillento que los caracteriza, en vez del color rojizo de los suelos con ciclos de humedecimiento y secado bien definidos. Estos suelos tienen menos contenido de arcilla que los suelos lateríticos, y pueden ser pedregosos y con buena permeabilidad.

- **Suelos en zonas húmedas (V2w, V3w, Latw):**

En estos casos, se trata de suelos que tienen humedades naturales sumamente altas, con frecuencia superiores al 100%, aparte de tener una estructura más porosa que suelos del mismo tipo ubicados en regiones más secas, lo cual los hace en general más blandos.

4.2.4.2. Uso de suelo

Dentro de las diversas observaciones y clasificaciones a imágenes satelitales realizadas, se observó que es posible clasificar el uso de suelo de la cuenca en tres categorías, entre ellas: bosque secundario, uso urbano y zonas de pastizales (Figura 4.10).

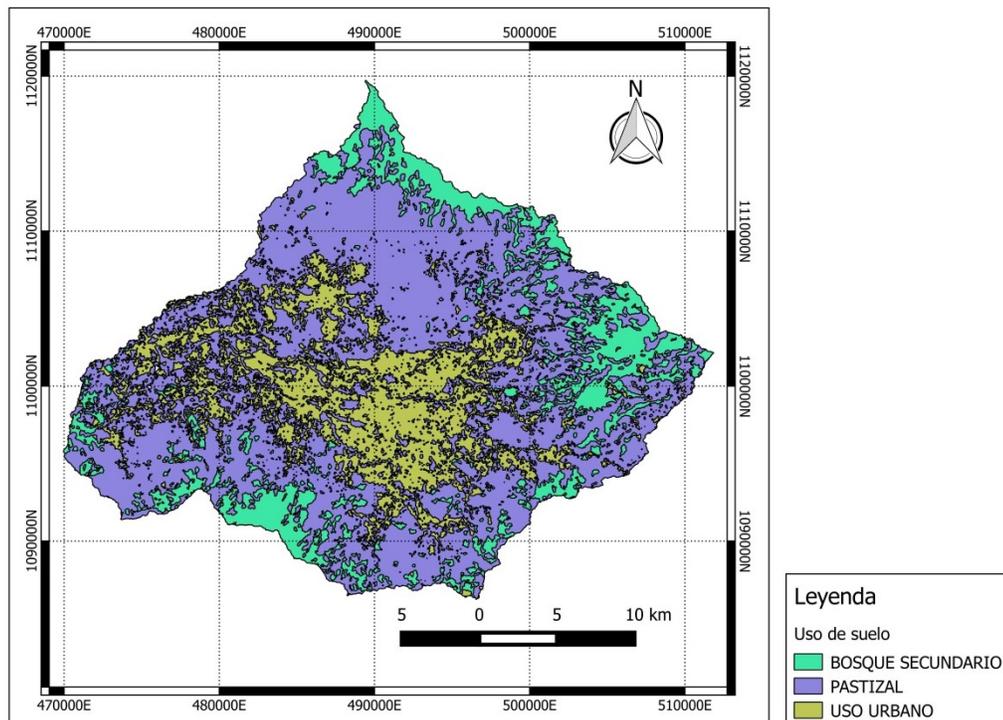


Figura 4.10. Clasificación por uso de suelo en la cuenca del río Virilla.

Se observa que la zona de pastizales corresponde a prácticamente el 60% del área de cobertura, esta categoría encierra tanto regiones de poca cobertura boscosa pero cubiertas por pasto, áreas de cultivo (café y cultivos ornamentales principalmente).

Cuadro 4.9. Detalle de clasificación geológica.

Tipo de cobertura	Área [km²]	%
Bosque secundario	127,4	17,2%
Uso Urbano	171,6	23,2%
Pastizales	440,1	59,5%
Σ	739,1	100,0%

La región boscosa norte es la única que permanece y permanecerá en el tiempo pues se trata de un cordón montañoso protegido a nivel nacional (parques nacionales y reservas biológicas).

Capítulo 5. Resultados de la modelación hidrológica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del proceso de calibración de los modelos hidrológicos para cada zona en estudio. Tal y como se mencionó anteriormente, la simulación se realizó a escala mensual utilizando el modelo WEAP.

El área de estudio se subdividió en cuatro regiones tal y como se muestra en la Figura 5.1, donde en cada una de las zonas señaladas se planteó una modelación independiente con entrada de acuerdo a la información de caudal disponible, la cual se indica en el Cuadro 5.1. Lo anterior se da porque no en todos los casos se contaba con suficiente información de esta variable.

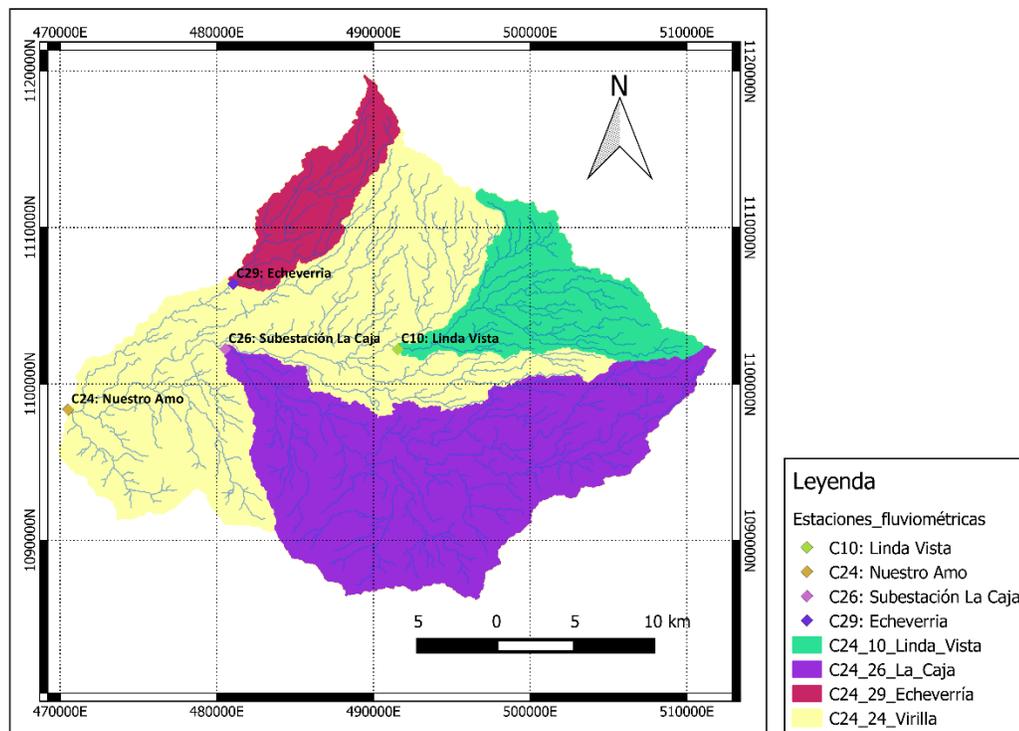


Figura 5.1. División de la cuenca del río Virilla en subcuencas de estudio.

Cada una de las cuencas señaladas se discretiza según bandas de elevación tomando en consideración el tipo de cobertura que impera en cada una de las regiones, por ejemplo: densa cobertura boscosa, plantaciones forestales, pastizales, zonas de baja cobertura vegetal, suelo descubierto y zona urbana.

Cuadro 5.1. Períodos de calibración y validación.

Cuenca	Período Calibración	Período Validación
C24_10: Linda Vista	May-70 – Abr-85	May-85 – Abr-89
C24_26: Subestación La Caja	May-70 – Abr-88	May-90 – Abr-03
C24_29: Echeverría	May-04 – Abr-16	May-91 – Abr-96
C24_24: Nuestro Amo	May-81 – Abr-06	May-09 – Abr-16

5.1. Resultados Calibración

El proceso de calibración se podría definir como el paso donde es posible encontrar una combinación de parámetros mediante la cual se representa satisfactoriamente la dinámica de los procesos asociados a la escorrentía de la cuenca. Dicha representación se evalúa a partir de la aplicación de los criterios de eficiencia (Sección 2.1.3) comparando los caudales observados y simulados.

A continuación, desde la Figura 5.2 y hasta la Figura 5.5 se muestran los resultados obtenidos del proceso de calibración de las subcuencas señaladas en la Figura 5.1, en cada una de las figuras se muestra: a) Caudales simulados, observados y precipitación. b) Variación promedio mensual durante el año (año cronológico). c) Curva de duración de caudales a nivel mensual. d) Correlación entre caudales simulados y observados.

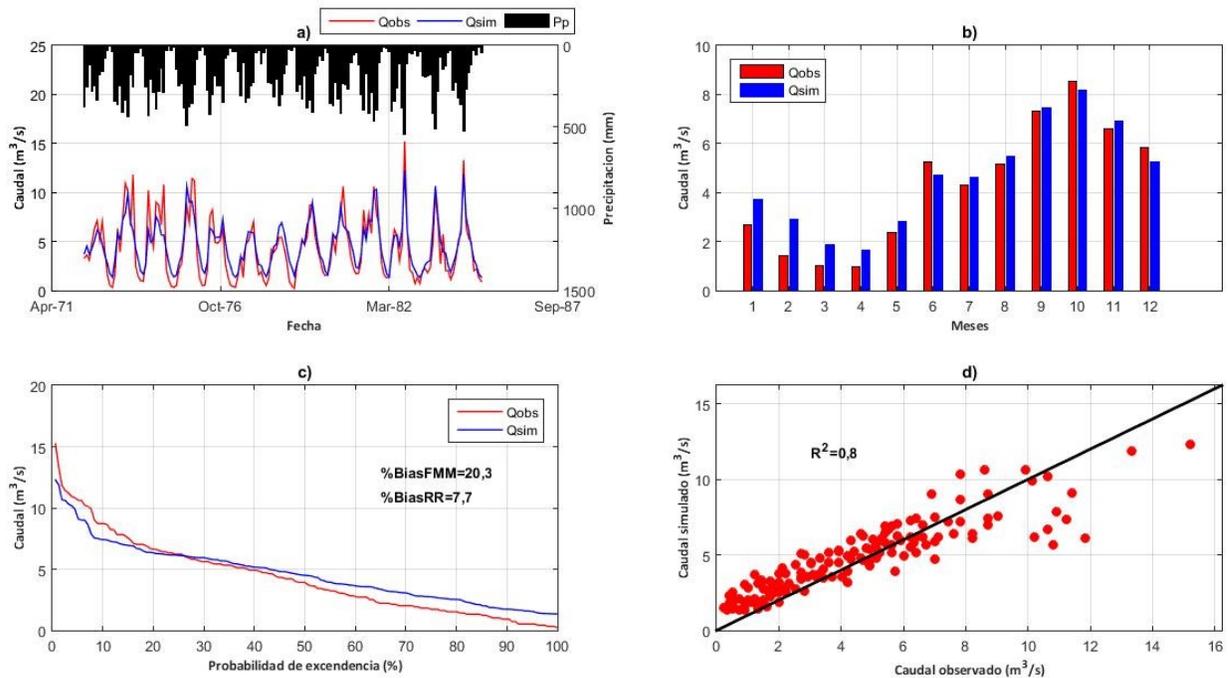


Figura 5.2. Resultados de calibración cuenca C24_10: Linda Vista.

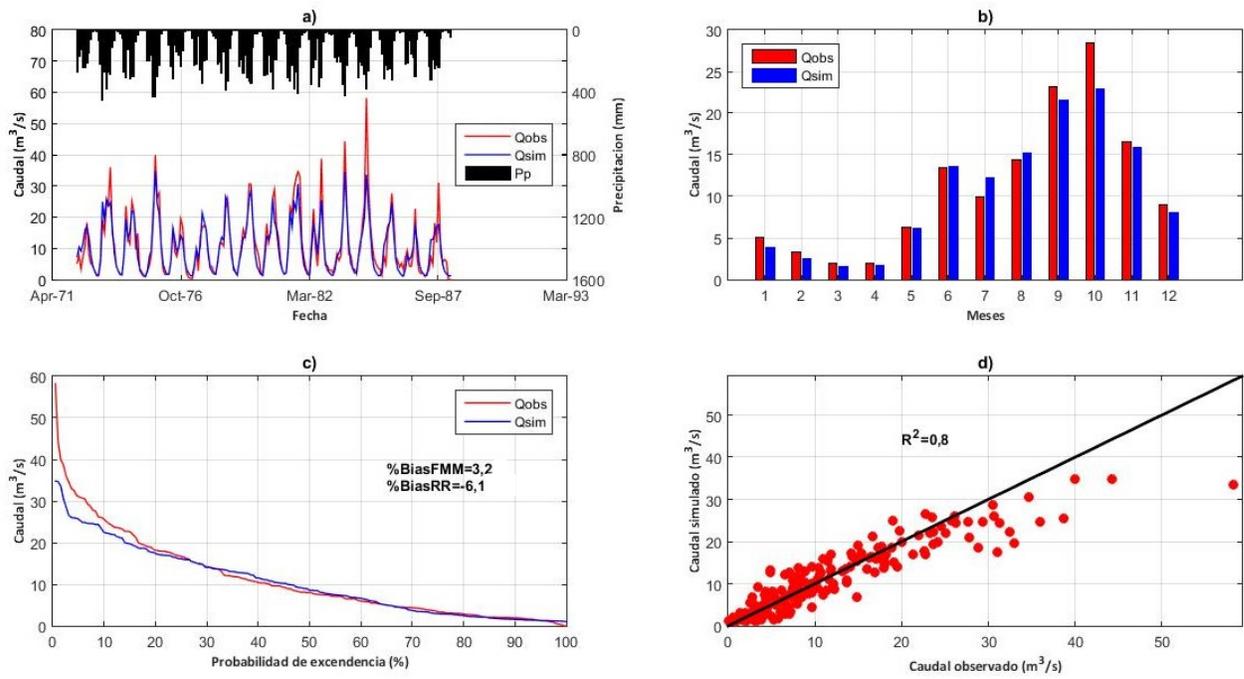


Figura 5.3. Resultados de calibración cuenca C24_26: Subestación La Caja.

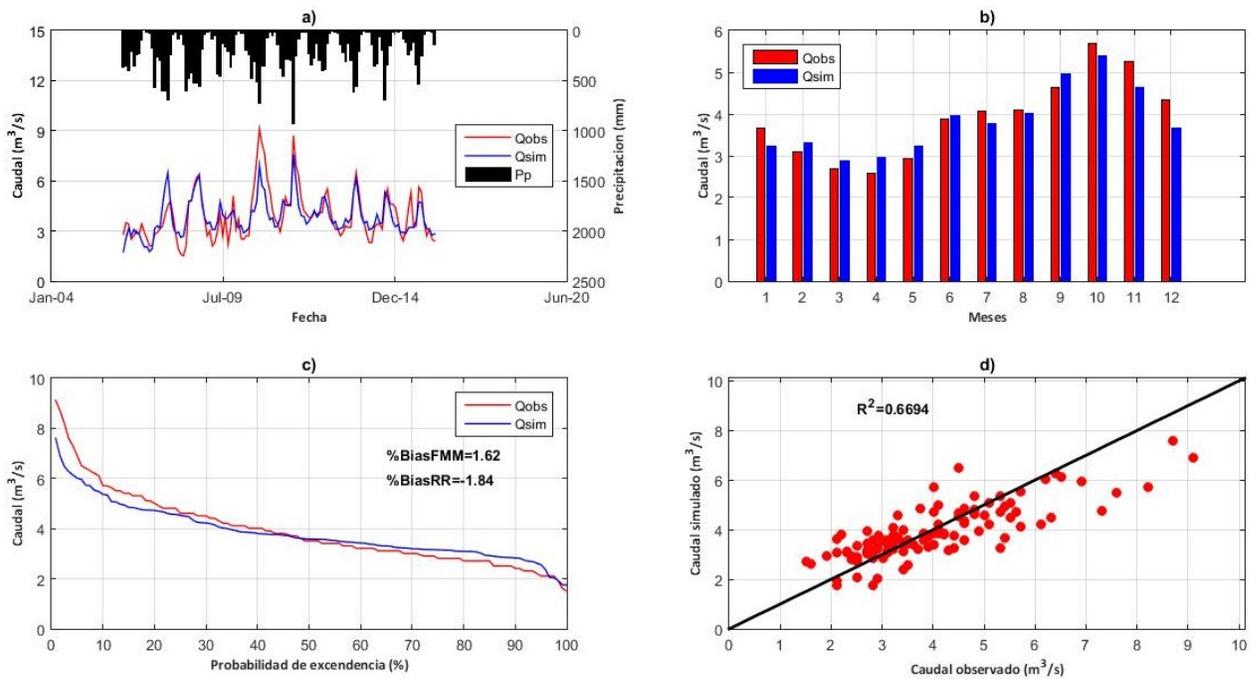


Figura 5.4. Resultados de calibración cuenca C24_29: Echeverría.

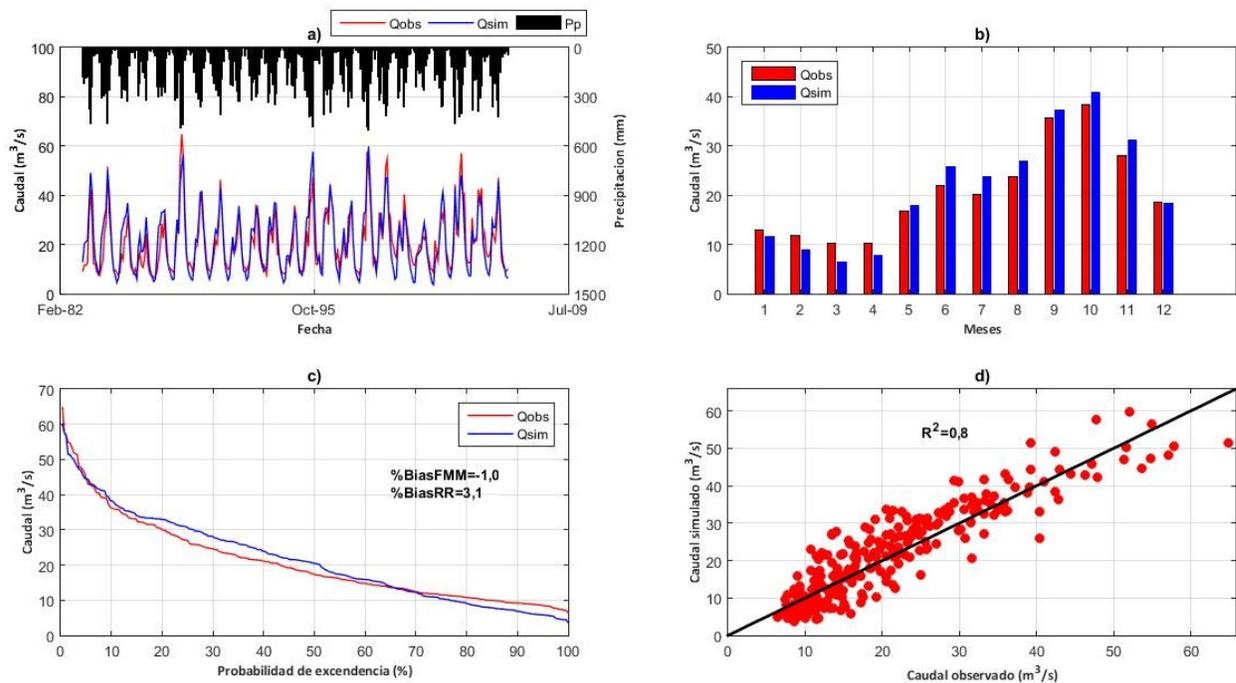


Figura 5.5. Resultados de calibración cuenca C24_24: Nuestro Amo.

El Cuadro 5.2 muestra los resultados obtenidos de los criterios de eficiencia utilizados para cada una de las regiones calibradas.

Tal y como se observa en el Cuadro 5.2 y de acuerdo a lo establecido por Moriasi *et al.* (2007) los valores obtenidos para los indicadores NSE y RSR se podrían clasificar como buenos y muy buenos. En el caso específico de la cuenca C24_29_Echeverría, cuenta con un registro continuo de caudales muy corto y se presentaron dificultades para que el coeficiente NSE aumentara más allá del 0,7 obtenido, por lo que, al éste clasificarse como satisfactorio se decidió utilizarlo de esa manera.

Cuadro 5.2. Resumen de cálculo los criterios de eficiencia en las cuencas calibradas.

Cuenca \ Criterio	NSE	LNSE	R ²	RSR	%BiasRR	%BiasFMM
C24_10: Linda Vista	0,8	0,7	0,8	0,5	7,8	20,4
C24_26: Subestación La Caja	0,8	0,6	0,9	0,4	-6,2	3,3
C24_29: Echeverría	0,7	0,6	0,7	0,6	-1,8	1,6
C24_24: Nuestro Amo	0,8	0,6	0,8	0,5	3,4	-1,0

En el caso de los indicadores NSE, RSR y LNSE, los resultados se consideran satisfactorios para la modelación y los objetivos de esta investigación. Se considera que éstos cumplen de manera adecuada los patrones de caudal y comportamientos de cada cuenca.

Adicionalmente, se presenta en el Cuadro 5.3 el compendio de los parámetros obtenidos en cada uno de los casos de calibración.

Cuadro 5.3. Parámetros obtenidos como resultado del proceso de calibración.

Parámetro	Símbolo	C24_10: Linda Vista	C24_26: Subestación La Caja	C24_29: Echeverría	C24_24: Nuestro Amo
Capacidad de almacenamiento de agua en las raíces [mm]	Sw	60	150	1900	300
Capacidad de almacenamiento de agua en zona profunda [mm]	Dw	10000	5000	4300	9500
Factor de resistencia a la escorrentía	RRF	55	30	2,5	50 / 60 / 70 / 80
Conductividad hidráulica en zona de las raíces [mm/mes]	Ks	300	300	1900	18000
Conductividad hidráulica en zona profunda [mm/mes]	Kd	60000	67000	50	80000
Dirección de preferencia del flujo	f	0,2	0,45	0,2	0,35
Humedad en zona de las raíces [%]	Z1	30	30	30	30
Humedad en zona profunda [%]	Z2	20	20	20	20

Los resultados obtenidos, sobre todo a nivel de conductividades hidráulicas son correspondientes con valores investigados en la literatura y mencionados en el capítulo anterior.

5.2. Resultados Validación

Al igual que en el caso de la calibración, los resultados obtenidos en la validación de cada set de parámetros, se muestran en las Figura 5.6 y hasta la Figura 5.9. En cada una de las figuras se muestra a) Caudales simulados, observados y precipitación. b) Variación promedio mensual durante el año (año cronológico). c) Curva de duración de caudales a nivel mensual. d) Correlación entre caudales simulados y observados. De igual manera, en el Cuadro 5.4 se presentan los resultados asociados a dicho proceso tomando en consideración los criterios de eficiencia mencionados con anterioridad.

Cuadro 5.4. Resumen de cálculo los criterios de eficiencia en las cuencas validadas.

Criterio Cuenca	NSE	LNSE	R ²	RSR	%BiasRR	%BiasFMM
C24_10: Linda Vista	0,8	0,8	0,8	0,4	-2,0	4,1
C24_26: Subestación La Caja	0,8	0,5	0,9	0,4	-14,5	-10,9
C24_29: Echeverría	0,7	0,6	0,5	0,3	-14,5	-10,9
C24_24: Nuestro Amo	0,7	0,5	0,7	0,6	-13,9	2,4

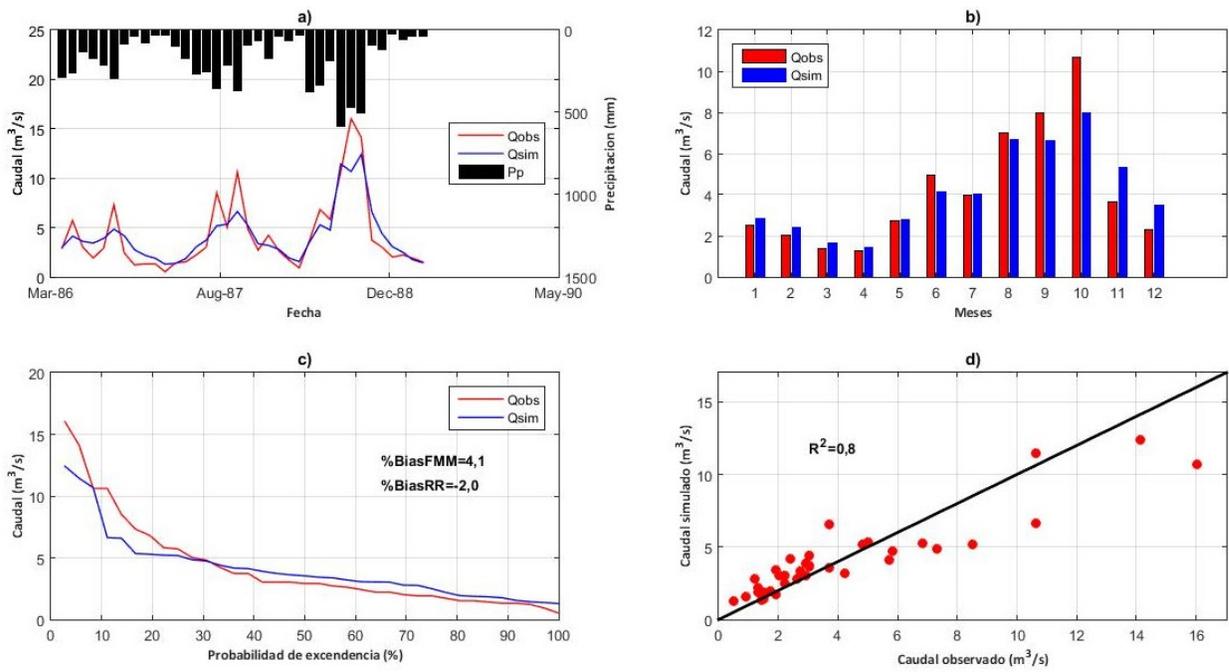


Figura 5.6. Resultados de validación cuenca C10: Linda Vista.

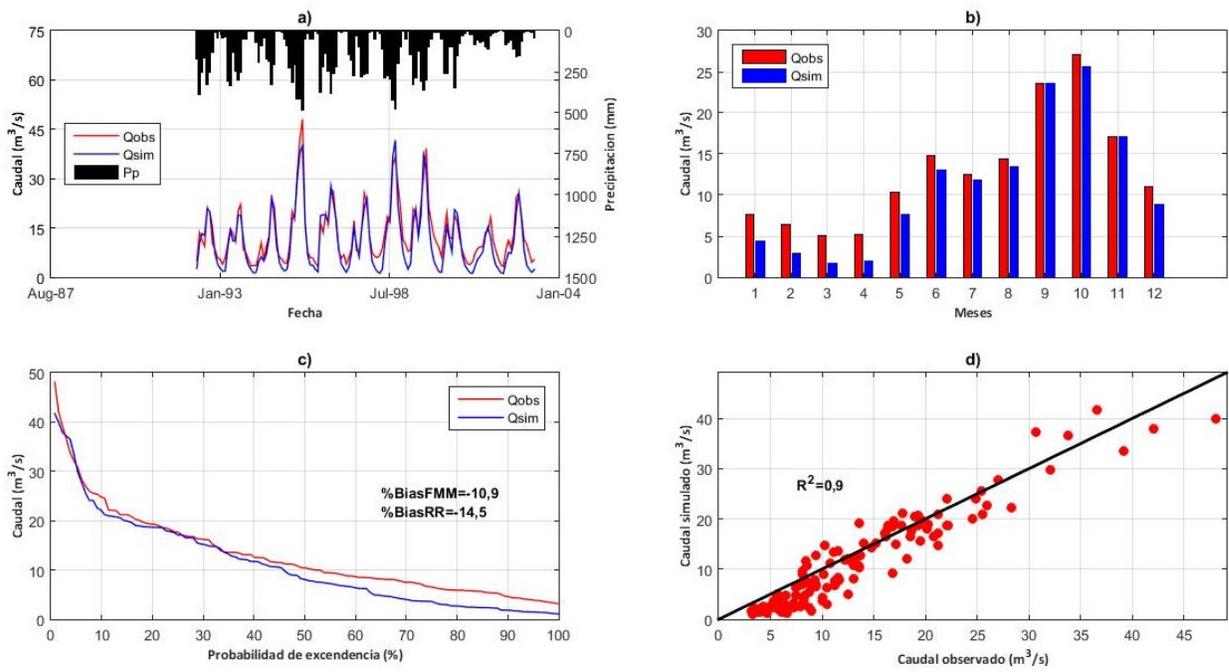


Figura 5.7. Resultados de validación cuenca C26: Subestación La Caja.

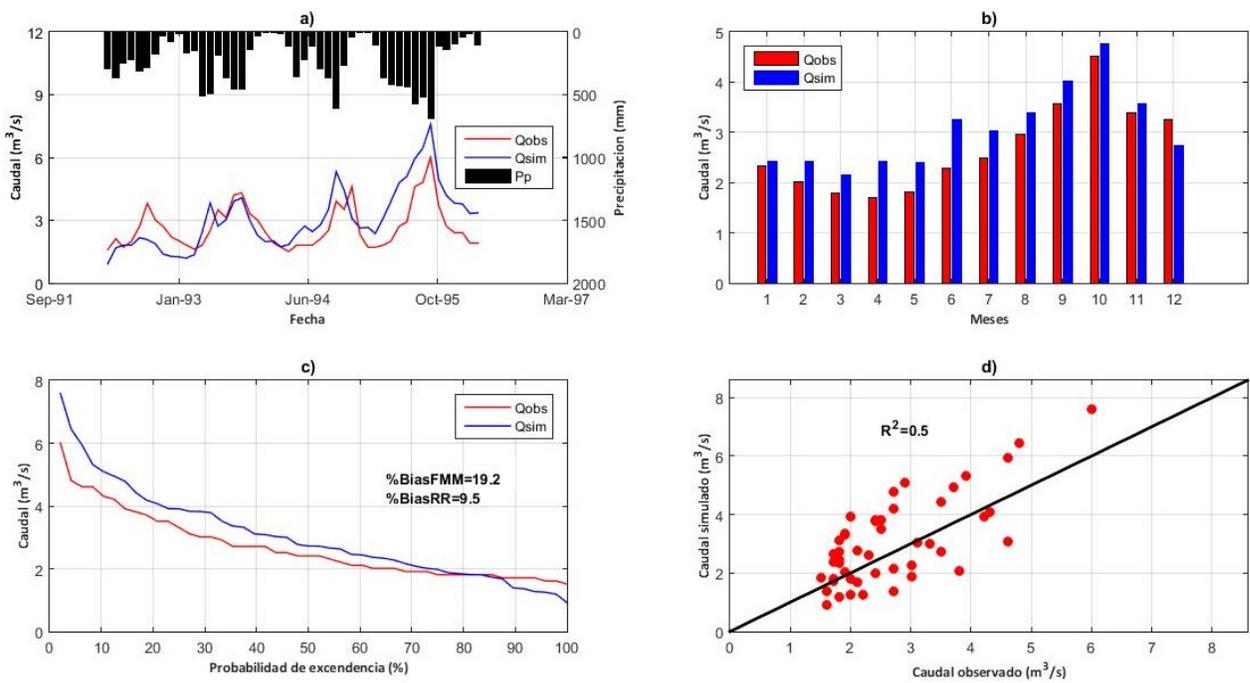


Figura 5.8. Resultados de validación cuenca C29: Echeverría.

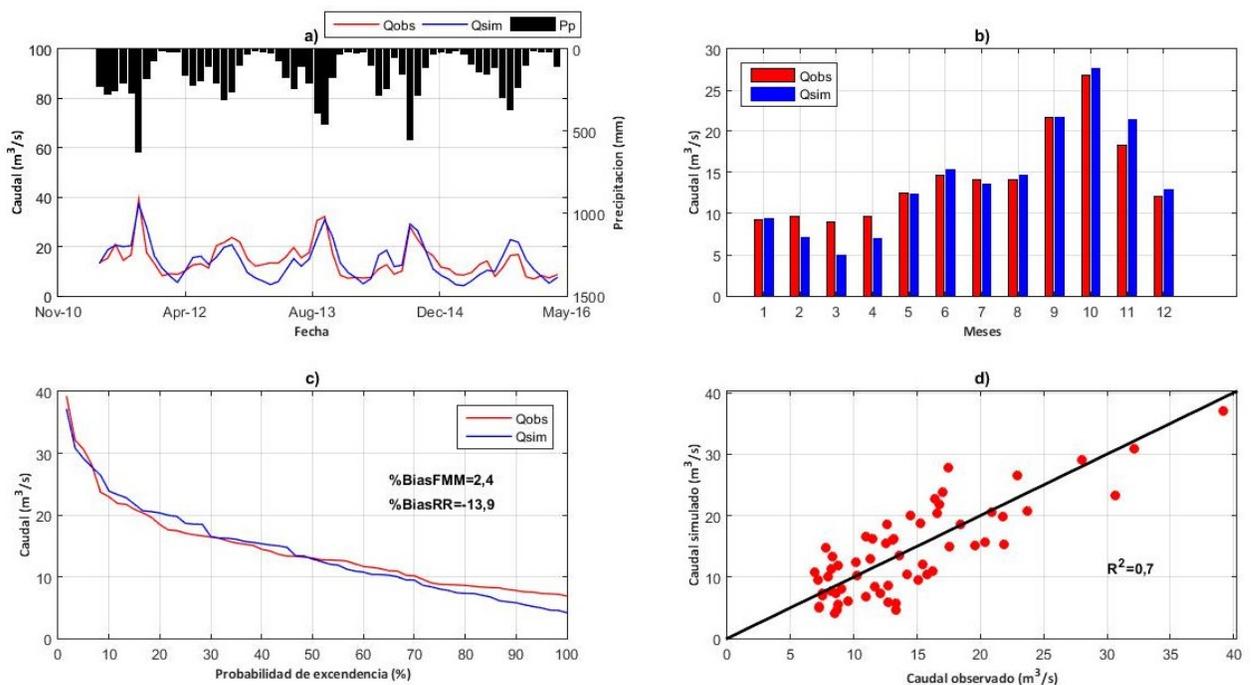


Figura 5.9. Resultados de validación cuenca C24: Nuestro Amo.

En el proceso de validación se evidencian deficiencias y/o resultados no muy alentadores aún en cuencas que durante el proceso de calibración mostraron buenos resultados. En específico, esta situación se muestra en la cuenca C24_24: Nuestro Amo. En este caso particular, el modelo presenta subestimación de caudales que superan el 80% de probabilidad de excedencia (caudales bajos), el resto de la curva de variación de caudales simulados presenta un

comportamiento que se ajusta de manera satisfactoria con la forma de la curva de duración correspondiente a las observaciones (Figura 5.9, c). Sin embargo, el modelo logra replicar de manera aceptable los patrones de comportamiento de las series de tiempo en la mayoría de las estaciones y los valores de flujo anual, lo que se observa a través de las correlaciones mensuales y los criterios de eficiencia mostrados.

5.3. Escenarios de Cambio Climático

Tal y como se mencionó en los apartados 2.2 y 3.2, una vez realizado el escalamiento espacial y temporal de las variables de los GCM, precipitación y temperatura, (funciones de transferencia utilizadas se muestran en el Anexo 1), se obtienen las siguiente curvas de variación estacional (Figura 5.10), así las cosas es más simple observar el comportamiento y las variaciones de los ciclos en el año hidrológico de la cuenca del río Virilla a la altura de la estación Nuestro Amo con respecto a la línea base (1985/86-2004/05) establecida por los modelos.

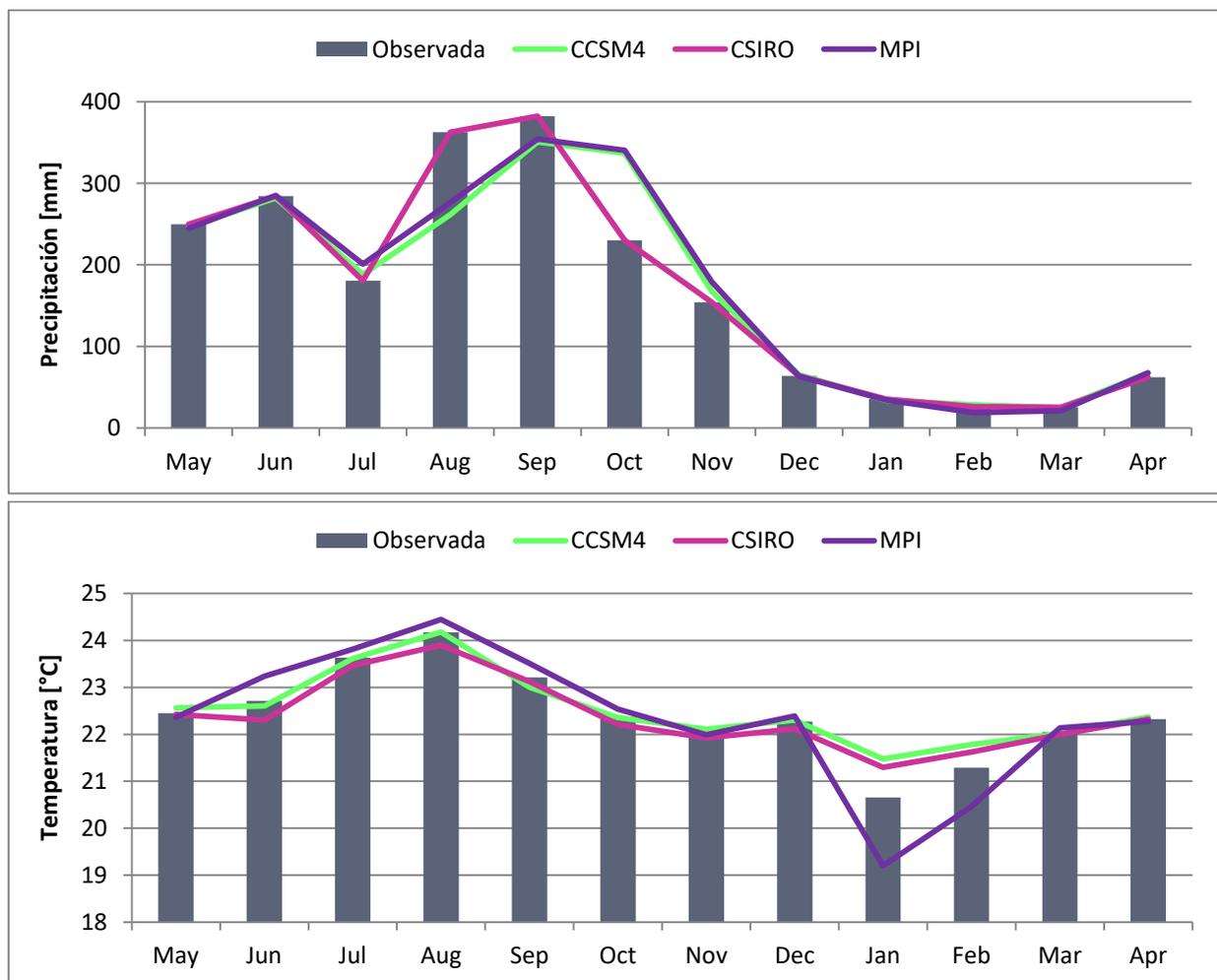


Figura 5.10. Curvas de variación estacional para precipitación y temperatura de los 3 GCM en período de línea base (1985/86-2004/05).

Efectivamente, se observa que los modelos, a través del empleo de funciones de transferencia, logran representar en términos generales la estacionalidad presente en el país. Así las cosas de acuerdo a lo que se observa en la Figura 5.10, el GCM que representa de mejor manera la curva de variación real del sitio de estudio (cuenca del río Virilla definida a la altura de la estación Nuestro Amo) es el modelo CSIRO, en específico porque logra captar adecuadamente la disminución de precipitación presente en los meses de julio y octubre. Adicionalmente, con respecto a los otros modelos, en apariencia están desplazando en un mes el punto de mayor precipitación en el año. Es decir, el desfase se observa durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

En el caso específico de la temperatura y tomando en cuenta cada escenario (Figura 5.11 y Figura 5.12) se muestra una fuerte tendencia al aumento de esta variable. (Figura 5.11 (a) y Figura 5.12 (a)).

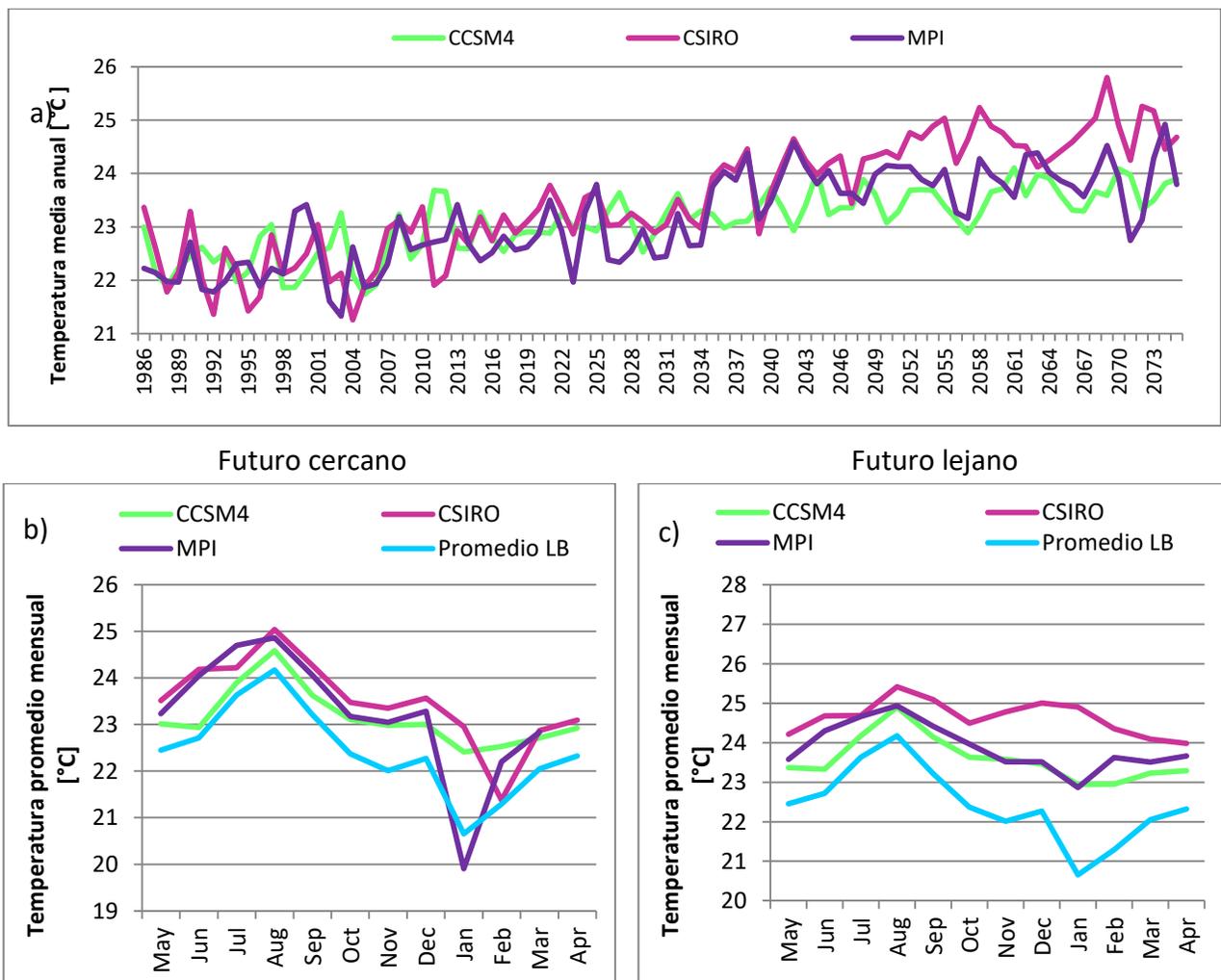


Figura 5.11. Escenario 4.5. a) Proyección de temperatura media anual. b). Curva de variación estacional de temperatura futuro cercano y c). Curva de variación estacional de temperatura futuro lejano.

En términos generales, para el caso del escenario 4.5, en el futuro cercano se proyectan variaciones de entre 0,1°C y 1,9°C y para el futuro lejano aumentos que oscilan entre los 0,5°C y los 3,6°C. Consecuentemente, en el caso del escenario 8.5, las variaciones se proyectan entre los 0,4 °C y los 3,4°C para el caso del futuro cercano y 0,7°C y 4,4°C para el futuro lejano (Cuadro 5.5).

Las curvas de variación estacional en ambos casos muestran diferencias importantes con respecto a la línea base, con un aumento considerable de temperatura durante el mes de agosto y una abrupta disminución en el mes de enero.

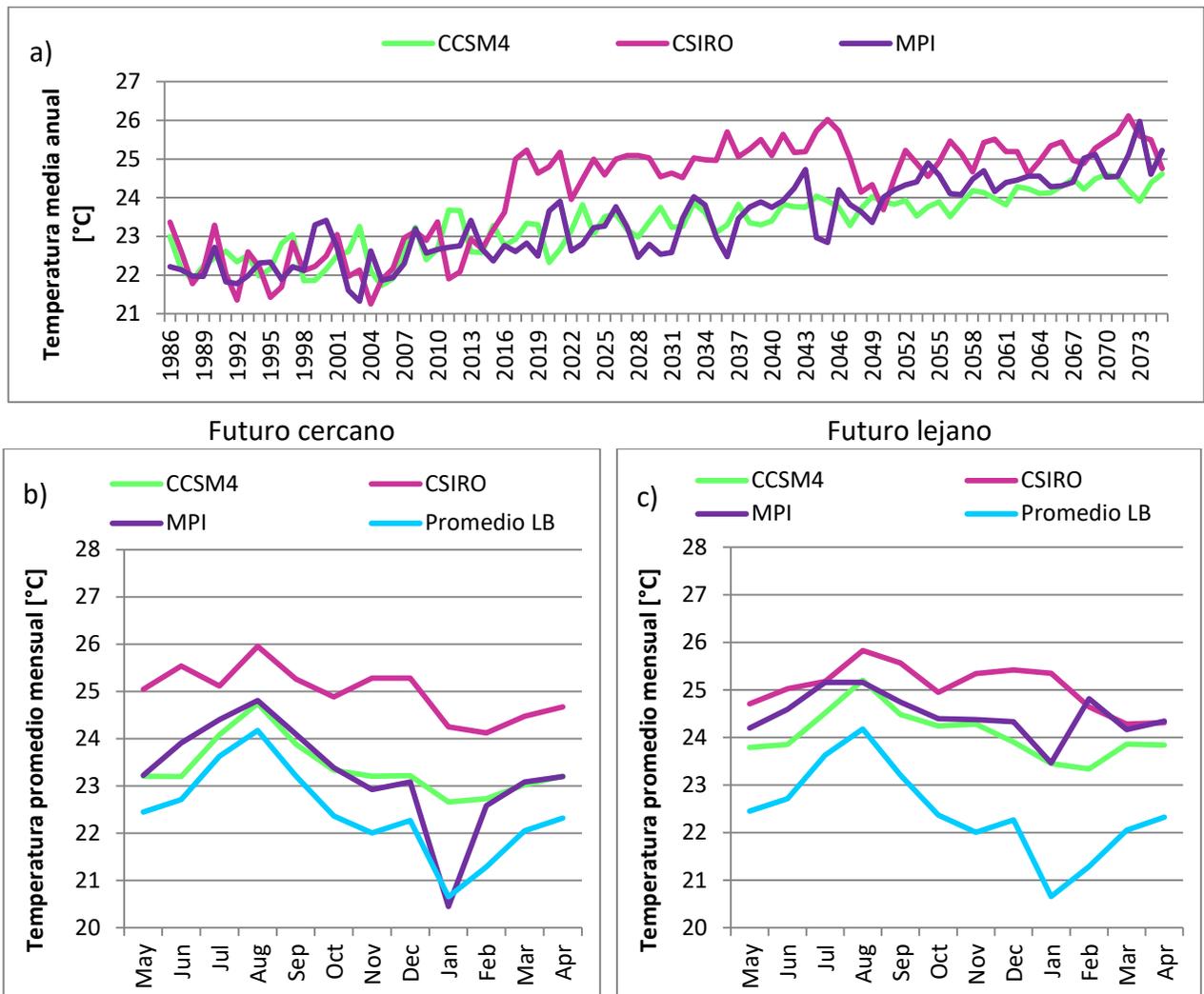


Figura 5.12. Escenario 8.5. a) Proyección de temperatura media anual. b). Curva de variación estacional de temperatura futuro cercano y c). Curva de variación estacional de temperatura futuro lejano.

Cuadro 5.5. Estimación de variación temperatura [°C].

Futuro cercano									
	LB			Escenario 4.5			Escenario 8.5		
	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI
May	22,6	22,4	22,4	0,5	1,1	0,9	0,6	2,6	0,9
Jun	22,6	22,3	23,2	0,3	1,9	0,8	0,6	3,2	0,7
Jul	23,6	23,5	23,8	0,3	0,8	0,9	0,5	1,6	0,6
Ago	24,2	23,9	24,4	0,4	1,1	0,4	0,6	2,1	0,4
Sep	23,0	23,1	23,5	0,6	1,1	0,6	0,9	2,1	0,6
Oct	22,4	22,2	22,5	0,8	1,3	0,6	1,0	2,7	0,9
Nov	22,1	21,9	22,0	0,9	1,4	1,1	1,1	3,4	0,9
Dic	22,3	22,1	22,4	0,7	1,4	0,9	0,9	3,2	0,7
Ene	21,5	21,3	19,2	0,9	1,7	0,7	1,2	3,0	1,3
Feb	21,8	21,6	20,5	0,7	0,1	1,7	0,9	2,5	2,1
Mar	22,0	22,0	22,1	0,7	0,9	0,7	1,0	2,5	1,0
Abr	22,4	22,3	22,3	0,5	0,8	0,7	0,8	2,3	0,9

Futuro lejano									
	LB			Escenario 4.5			Escenario 8.5		
	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI
May	22,6	22,4	22,4	0,8	1,8	1,2	1,2	2,3	1,8
Jun	22,6	22,3	23,2	0,7	2,4	1,1	1,3	2,7	1,4
Jul	23,6	23,5	23,8	0,6	1,2	0,9	0,9	1,7	1,4
Ago	24,2	23,9	24,4	0,7	1,5	0,5	1,0	1,9	0,7
Sep	23,0	23,1	23,5	1,1	2,0	0,9	1,5	2,5	1,2
Oct	22,4	22,2	22,5	1,3	2,3	1,4	1,9	2,7	1,9
Nov	22,1	21,9	22,0	1,5	2,9	1,5	2,2	3,4	2,4
Dic	22,3	22,1	22,4	1,2	2,9	1,1	1,6	3,3	1,9
Ene	21,5	21,3	19,2	1,5	3,6	3,7	2,0	4,4	4,3
Feb	21,8	21,6	20,5	1,2	2,7	3,2	1,6	3,0	4,4
Mar	22,0	22,0	22,1	1,2	2,1	1,4	1,8	2,3	2,0
Abr	22,4	22,3	22,3	0,9	1,7	1,4	1,5	2,0	2,1

Se obtuvo entonces que el mayor aumento de temperatura se presentó en las simulaciones empleando el modelo CSIRO, donde a nivel mensual y en el escenario RCP 4.5 las variaciones van desde los 1,9°C hasta los 3,6°C, en el caso del futuro cercano y lejano respectivamente. Por otro lado, para el escenario RCP 8.5, las variaciones ascienden a los 3,4°C y los 4,4°C respectivamente.

En lo referente a precipitación, la Figura 5.13 y la Figura 5.14, las curvas de variación estacional en términos generales conservan la forma originalmente mostrada, acentuando en mayor o menor medida las disminuciones en el mes de julio y los aumentos de agosto. Además, en el

caso del escenario 4.5, durante la época seca se observa un pequeño aumento de precipitación en el mes de enero (CSIRO) o febrero (CCSM4). De igual manera al observar el comportamiento al inicio de la época lluviosa, el modelo CSIRO proyecta en mes de mayo como el mes de mayor precipitación tanto en el caso del futuro cercano como el futuro lejano para ambos escenarios de RCP.

En la Figura 5.13 (a) y la Figura 5.14 (a), a simple vista no se evidencia una tendencia clara al aumento o disminución de la variable. Para el respectivo análisis se muestra el Cuadro 5.6 para mayor y mejor detalle.

En cuanto a precipitación, el escenario RCP 4.5 presenta diferencias en cuanto a la forma de la curva de variación estacional pues, en específico el mes de agosto ya no se proyecta como uno de los meses de mayor precipitación como se indica durante el período base, sino que en esta oportunidad el protagonismo en este sentido se concentra en el mes de septiembre.

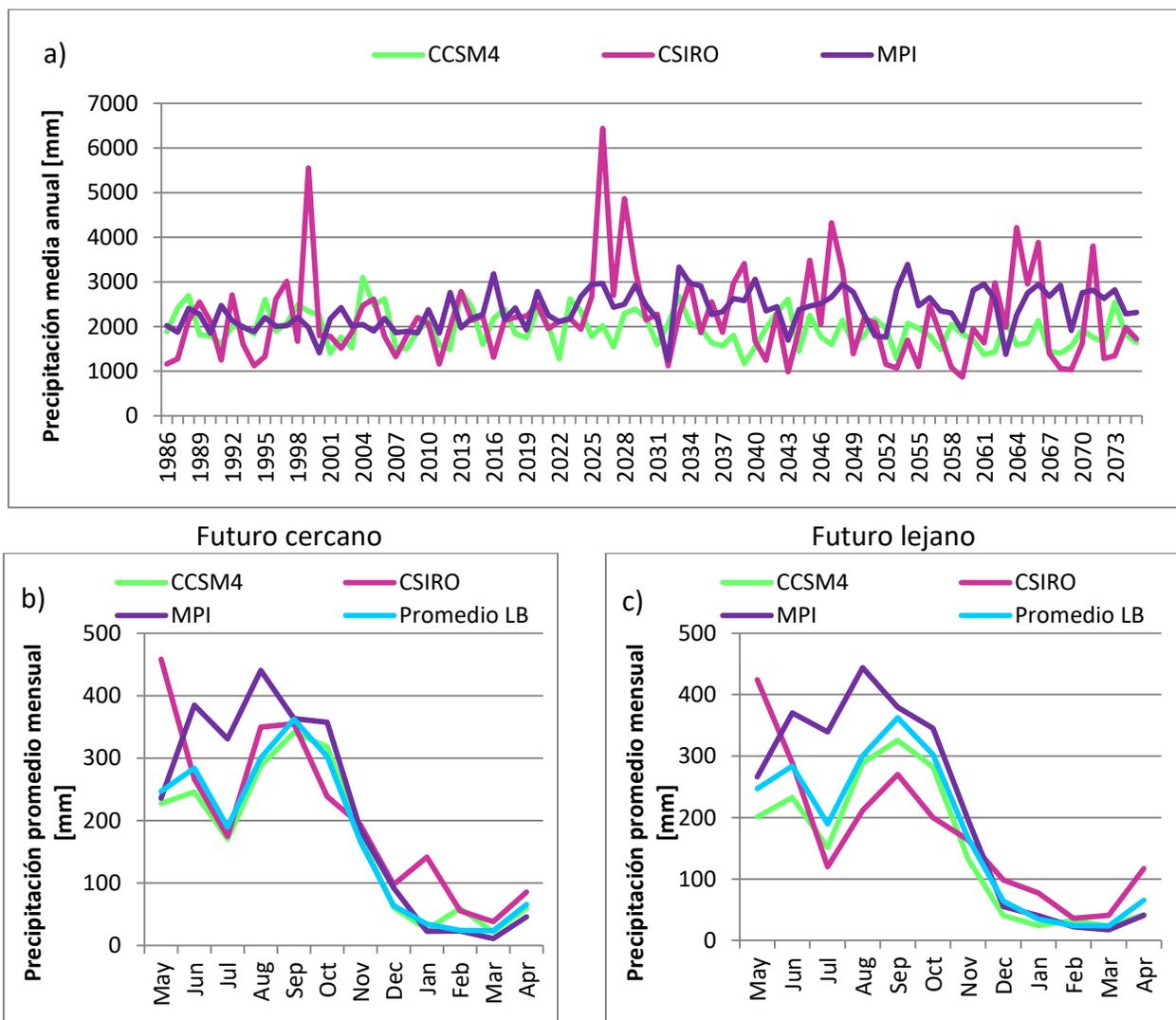


Figura 5.13. Escenario 4.5 a) Proyección de precipitación media anual. b). Curva de variación estacional de precipitación, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de precipitación, futuro lejano.

El escenario 8.5 muestra curvas de variación estacional que en apariencia se ajustan de una manera más adecuada a lo mostrado en la Figura 5.10. No obstante, se evidencian casos como aumentos durante el mes de febrero (MPI – futuro cercano y lejano), se mantiene la marcada disminución durante el mes de julio y del aumento considerable en el mes de mayo (CSIRO – futuro cercano y lejano).

Adicionalmente, en el caso del futuro cercano (RCP 8.5), la forma de la curva de variación estacional, pone especial énfasis en el mes de agosto como mes de mayor precipitación durante el año. El modelo CSIRO además proyecta abril y mayo como meses de aumento de esta variable, y por su parte el modelo CCSM4 se conserva un poco más fiel a la línea base, con la única diferencia en que se observa un leve aumento de precipitación en el mes de febrero.

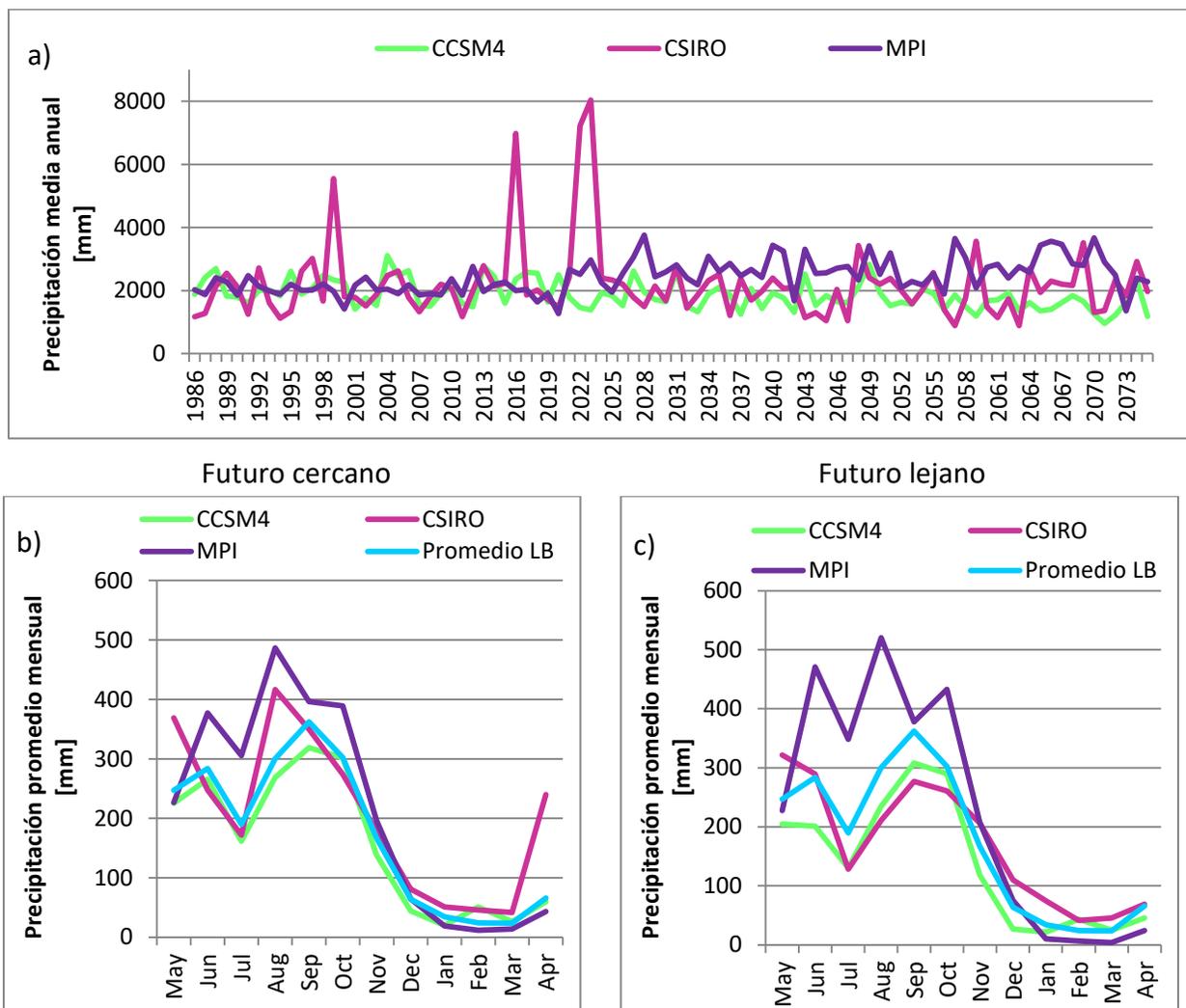


Figura 5.14. Escenario 8.5 a) Proyección de precipitación media anual. b). Curva de variación estacional de precipitación, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de precipitación, futuro lejano.

En términos de estacionalidad, en la Figura 5.14 (c) se observa que la variación es notoria sobre todo en lo que respecta a la época lluviosa. El GCM MPI varía considerablemente la forma de

curva donde no solo se observa una disminución en julio, sino que proyecta otra disminución en septiembre, produciendo un efecto visual que semeja una sierra durante ese período.

Según lo que se muestra en el Cuadro 5.6, en el caso del futuro cercano y RCP 4.5, así como se estiman aumentos de hasta un 75% en la precipitación, también disminuciones de hasta 88%, y en el caso del RCP 8.5 estos valores oscilan entre el 44% y el 78%. En contraparte, para el caso del futuro lejano, se estiman aumentos y disminuciones de entre 54%, 71% y 52%, 452% para RCP 4.5 y 8.5 respectivamente.

Cuadro 5.6. Variaciones porcentuales de precipitación.

Futuro cercano									
	LB			Escenario 4.5			Escenario 8.5		
	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI
May	246,6	249,6	244,8	-8,4%	45,5%	-3,9%	-9,3%	32,3%	-8,2%
Jun	282,0	284,5	285,1	-14,7%	-6,7%	25,9%	-6,0%	-14,9%	24,5%
Jul	188,1	180,5	201,0	-10,2%	-3,2%	39,3%	-16,7%	-5,0%	34,2%
Aug	261,8	362,7	276,7	9,1%	-3,7%	37,2%	2,6%	12,9%	43,2%
Sep	350,8	382,4	354,2	-3,0%	-7,7%	2,5%	-10,0%	-9,2%	10,6%
Oct	337,1	230,0	340,4	-6,0%	3,6%	4,7%	-11,7%	16,1%	12,5%
Nov	167,2	154,1	178,9	4,1%	20,2%	3,4%	-20,9%	13,6%	8,8%
Dec	65,1	63,5	63,2	-7,0%	34,8%	31,4%	-47,1%	21,7%	1,6%
Ene	33,8	35,3	34,0	-32,3%	75,1%	-48,7%	-69,8%	30,5%	-78,0%
Feb	28,3	25,9	18,6	52,5%	53,5%	19,5%	44,3%	43,3%	-61,8%
Mar	24,6	25,3	20,9	-13,9%	34,2%	-87,6%	6,6%	39,7%	-52,8%
Abr	67,3	62,2	67,6	-12,6%	27,4%	-47,9%	-12,6%	74,1%	-57,0%

Futuro lejano									
	LB			Escenario 4.5			Escenario 8.5		
	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI
May	246,6	249,6	244,8	-22,6%	41,1%	8,0%	-20,4%	22,4%	-7,5%
Jun	282,0	284,5	285,1	-21,1%	1,5%	23,0%	-40,2%	1,8%	39,5%
Jul	188,1	180,5	201,0	-24,2%	-50,4%	40,8%	-44,5%	-40,7%	42,3%
Aug	261,8	362,7	276,7	9,3%	-71,1%	37,6%	-11,5%	-72,1%	46,8%
Sep	350,8	382,4	354,2	-7,8%	-41,6%	6,7%	-13,9%	-38,0%	6,2%
Oct	337,1	230,0	340,4	-19,4%	-15,0%	1,4%	-16,3%	11,9%	21,4%
Nov	167,2	154,1	178,9	-26,2%	6,0%	9,1%	-41,2%	25,2%	13,6%
Dec	65,1	63,5	63,2	-61,3%	35,2%	-14,3%	-140,3%	42,4%	16,4%
Ene	33,8	35,3	34,0	-38,2%	54,4%	16,0%	-55,1%	52,7%	-238,7%
Feb	28,3	25,9	18,6	13,4%	28,2%	15,8%	34,7%	37,3%	-173,1%
Mar	24,6	25,3	20,9	-6,2%	38,5%	-21,3%	0,8%	44,4%	-452,1%
Abr	67,3	62,2	67,6	-60,1%	46,8%	-65,4%	-48,2%	10,2%	-180,2%

Disminuciones tan extremas como las estimadas durante la época seca a partir del GCM MPI en el RCP 8.5 del futuro lejano muestran procesos de sequía donde las precipitaciones se podrían ver ausentes hasta por cuatro meses consecutivos.

Por otro lado, a nivel de caudales, las variaciones existentes no son tan evidentes, al menos en lo que respecta al registro completo (Figura 5.15 (a)). No obstante, a nivel de curva de variación estacional, los meses que muestran mayor variación, en lo referente a futuro cercano, son mayo y septiembre, situación que se mantiene en el caso del futuro lejano.

Nuevamente, en ambas figuras (Figura 5.15(a) y Figura 5.16(a)) no es tan evidente determinar si existe una tendencia en el registro de datos, sin embargo, lo que sí es visible es la fuerte correspondencia de las curvas (b) y (c) en la Figura 5.15 y Figura 5.16 con respecto a sus homologas de la Figura 5.13 y la Figura 5.14.

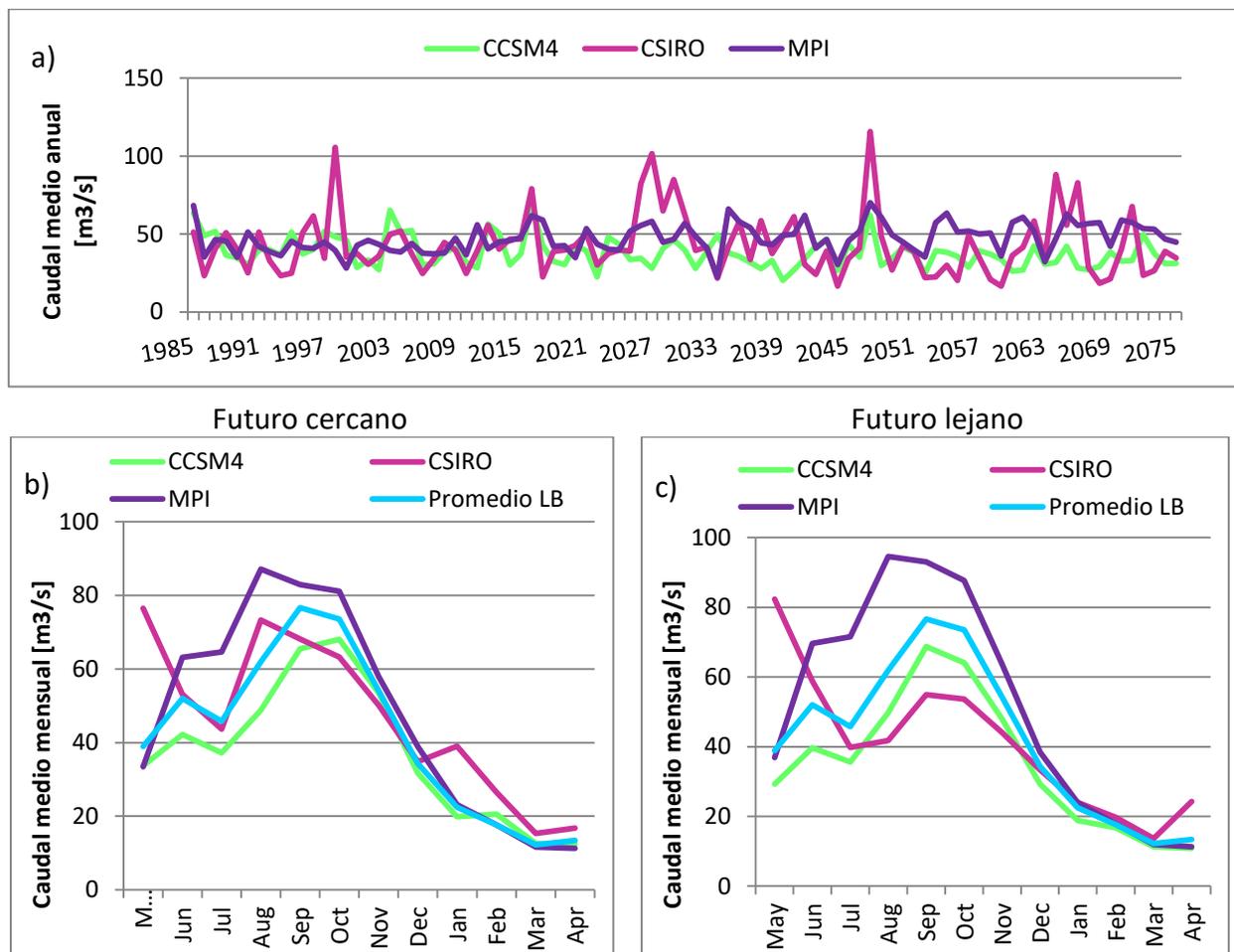


Figura 5.15. Escenario 4.5. a) Proyección de caudal medio anual. b). Curva de variación estacional de caudal, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de caudal, futuro lejano.

Con base en lo expuesto en el Cuadro 5.7 es evidente que le GCM más crítico de los analizados corresponde al CCSM4 pues sin importar el escenario RCP ni el futuro analizado, en el 95% de

los casos se estiman disminuciones de caudal para todos los meses del año, lo cual, de igual manera corresponde con los resultados obtenidos para la variable precipitación, y consecuentemente esto último acompañado de un aumento constante de temperatura a lo largo de todo el año.

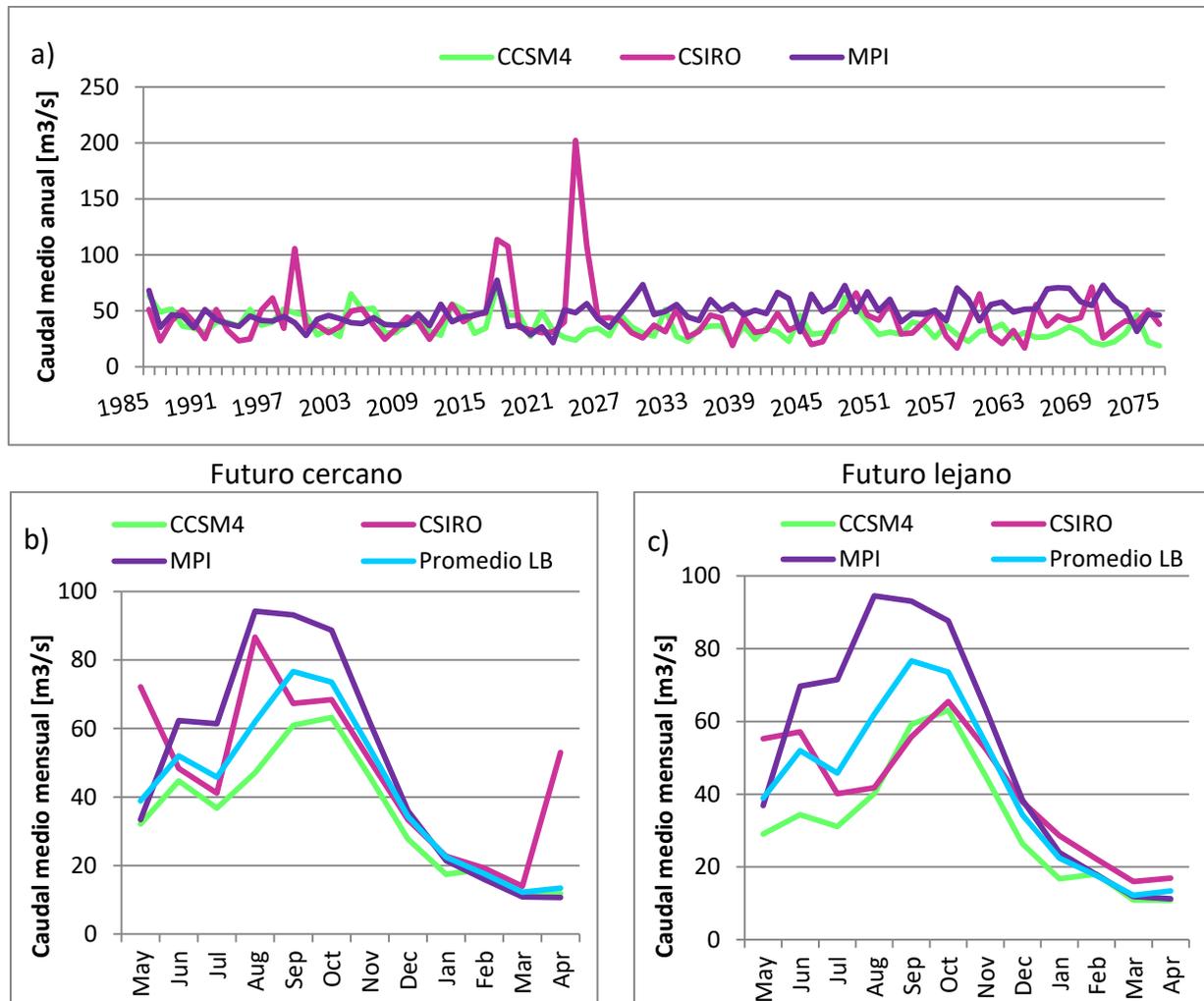


Figura 5.16. Escenario 8.5. a) Proyección de caudal medio anual. b). Curva de variación estacional de caudal, futuro cercano y c). Curva de variación estacional de caudal, futuro lejano.

La curva de variación estacional que corresponde a los caudales simulados en el período de línea base (LB) se muestra en la Figura 5.17. No obstante, en cada caso de la Figura 5.15 y la Figura 5.16 donde sea necesario, se muestra la LB de referencia. Al igual que la Figura 5.10, el comportamiento de la curva guarda estrecha relación con lo que se estima ocurre a nivel de precipitación. Cabe acotar entonces que lo descrito anteriormente de igual manera guarda estrecha relación con la curva de variación estacional obtenida a partir de las observaciones reales de caudal de la estación Nuestro Amo. En sí, es posible asegurar en este punto que el modelo que representa de mejor manera el comportamiento de las variables hidrometeorológicas y fluviométricas en la cuenca de estudio es el CCSM4.

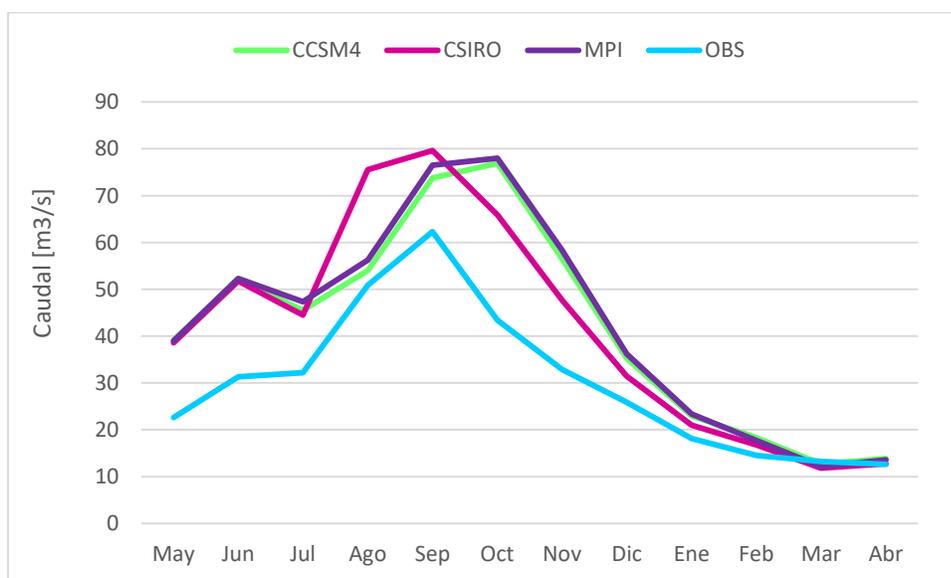


Figura 5.17. Curva de variación estacional. Caudales simulados en período de línea base y observados.

A partir de la base de datos del CCSM4 se proyectan, para RCP 4.5 y 8.5, disminuciones de caudal durante todo el año excepto en el mes de febrero en el caso del futuro cercano, mientras que para el futuro lejano, se estima una disminución constante de caudales durante todo el año indistintamente de la época.

Cuadro 5.7. Variaciones porcentuales de caudal.

Futuro cercano									
Mes	LB			Escenario 4.5			Escenario 8.5		
	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI
May	39,1	38,6	39,0	-16,2%	49,6%	-16,7%	-21,9%	46,5%	-16,8%
Jun	52,0	51,7	52,3	-23,2%	2,6%	17,1%	-16,3%	-7,0%	16,0%
Jul	45,5	44,5	47,4	-22,4%	-2,0%	26,7%	-23,8%	-8,1%	22,9%
Ago	54,0	75,5	56,3	-10,5%	-3,1%	35,4%	-14,7%	12,9%	40,3%
Sep	73,8	79,6	76,5	-12,6%	-16,8%	7,7%	-21,0%	-18,2%	17,9%
Oct	76,9	65,9	78,0	-13,0%	-4,1%	3,9%	-21,7%	3,8%	12,1%
Nov	56,5	47,7	58,3	-5,6%	5,0%	-0,5%	-23,1%	6,0%	5,7%
Dic	35,3	31,5	36,2	-11,1%	9,6%	7,0%	-27,4%	5,6%	-0,7%
Ene	22,9	21,0	23,3	-15,3%	46,3%	-1,0%	-31,5%	7,6%	-8,7%
Feb	18,4	16,8	17,7	10,5%	36,5%	-0,6%	3,1%	12,7%	-11,4%
Mar	12,7	11,8	12,1	-1,4%	22,7%	-4,2%	-11,5%	15,2%	-11,9%
Abr	13,8	12,8	13,5	-12,0%	23,6%	-20,1%	-17,8%	75,9%	-26,8%

Futuro lejano									
Mes	LB			Escenario 4,5			Escenario 8,5		
	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI	CCSM4	CSIRO	MPI
May	39,1	38,6	39,0	-33,7%	53,1%	-5,7%	-34,5%	30,2%	-23,0%
Jun	52,0	51,7	52,3	-30,9%	12,1%	24,9%	-51,4%	9,5%	34,3%
Jul	45,5	44,5	47,4	-28,0%	-12,0%	33,8%	-46,4%	-10,8%	36,1%
Ago	54,0	75,5	56,3	-8,4%	-80,8%	40,5%	-34,5%	-80,7%	47,5%
Sep	73,8	79,6	76,5	-7,4%	-44,9%	17,8%	-24,6%	-42,9%	22,0%
Oct	76,9	65,9	78,0	-20,0%	-22,7%	11,1%	-22,0%	-0,6%	21,5%
Nov	56,5	47,7	58,3	-17,9%	-8,3%	8,3%	-25,4%	9,2%	14,3%
Dic	35,3	31,5	36,2	-20,7%	5,6%	5,7%	-33,8%	17,0%	12,8%
Ene	22,9	21,0	23,3	-21,9%	12,5%	2,5%	-36,6%	26,6%	3,4%
Feb	18,4	16,8	17,7	-9,6%	15,0%	1,1%	-1,7%	24,4%	-4,9%
Mar	12,7	11,8	12,1	-12,2%	13,7%	-2,1%	-16,3%	26,0%	-10,1%
Abr	13,8	12,8	13,5	-28,0%	47,4%	-19,9%	-27,7%	24,5%	-36,3%

5.4. Discusión

A nivel de calibración y validación de modelos, se presentaron especiales problemas de calibración para el procesamiento de la cuenca C24_29: Echeverría, probablemente porque de las cuencas con la que se cuenta ésta presenta el registro de datos de más corta duración, el cual se vuelve aún más corto si se recuerda que en el proceso de simulación se estiman los dos primeros años de calibración y/o validación como período de calentamiento del sistema. Las diferencias en cuanto a los parámetros obtenidos se hacen evidentes al momento de comparar los obtenidos para todos los casos, Cuadro 5.3. Además, debido a la ubicación de la cuenca en cuestión, no se contaba con otros registros aguas abajo con los que fuera posible de alguna manera realizar una extensión de dicho registro.

Para la evaluación del proceso de calibración, muy a pesar de la situación en la cuenca mencionada (C24_29), los resultados obtenidos fueron satisfactorios tanto a nivel de criterio NSE y LNSE pues fue posible en alguna medida reproducir de manera adecuada para este análisis los caudales bajos y altos de los registros históricos y a nivel de %BiasRR (Cuadro 5.2) con niveles de sobreestimación y subestimación de variables que son manejables para el objetivo de la investigación. No obstante, la validación de dicho sistema hidrológico presentó complicaciones pues el nivel de subestimación de la variable ascendió al 14,5%.

Durante el resto del proceso de validación fue posible corroborar exitosamente la mayoría de las calibraciones realizadas, sobre todo para las cuencas C24_26: La Caja y C24_24: Nuestro Amo, donde los estadísticos calculados muestran un comportamiento adecuado del modelo y una caracterización satisfactoria de la cuenca en cuestión (Cuadro 5.4). Además, las curvas de duración logran una satisfactoria reproducción del comportamiento real de los datos.

Es importante además considerar que, al momento de utilizar y calibrar un modelo hidrológico, el sistema con el que se trabaja se caracteriza como si fuera tomando una fotografía en un momento y época específica y que se considera que bajo esta premisa los resultados obtenidos serán válidos en el futuro. No obstante, ante grandes cambios en el uso y cobertura del suelo, sería importante considerar un ajuste en el modelo o incluso la recalibración del mismo.

Aunque no son drásticas, se observan algunas diferencias en las curvas de variación estacional de los modelos CCSM4 y MPI con respecto al CSIRO como por ejemplo el retraso de un mes al pasar el punto máximo de la curva inicialmente representado en setiembre a octubre. Se proyecta además un segundo punto de caudal máximo durante el mes de junio y se pronuncia aún más la disminución durante el mes de julio. Además, se observa una leve tendencia al aumento del mismo en el mes de abril.

El Cuadro 5.7 evidencia en alguna medida los distintos niveles de criticidad que se manejan al emplear este tipo de modelos, por ejemplo, en este caso particular sería claro apuntar al modelo CSIRO como el más optimista con respecto a las proyecciones en las estimaciones de caudal realizadas, pues para ambos escenarios RCP y condiciones de futuro, es bastante consistente en señalar disminuciones durante los meses de época seca pero de igual manera proyecta un aumento en los meses de época seca. En segundo lugar estaría el modelo MPI, pues este último conserva la tendencia actual del comportamiento hidrometeorológico, es decir, estima aumentos durante la época lluviosa y disminuciones de caudal durante la época seca. Finalmente, el escenario bajo el modelo más crítico sería el CCSM4 pues prácticamente durante todos los meses del año estima disminuciones considerables de esta variable, lo anterior considerando ambos escenarios RCP y futuros tanto cercano como lejano.

De manera adicional, las observaciones realizadas se extienden a la variable precipitación, donde el comportamiento global se rige bajo las mismas acotaciones realizadas. Sin embargo, en el caso de la temperatura, se evidencia un aumento constante y sostenido de esta variable en todos los escenarios y modelos desarrollados (Cuadro 5.5).

Así las cosas, para el RCP 4.5, en el futuro cercano se estiman pequeños aumentos de temperatura de entre los 0,3°C y los 1,9°C mientras que para el futuro lejano estos valores ascienden a los 0,6°C y 3,6°C. En el RCP 8.5, el futuro cercano estima aumentos de entre 0,4°C y 3,4°C mientras que el futuro lejano proyecta variaciones entre los 0,9°C y 4,4°C.

En el caso del modelo CSIRO, los meses en los que se proyectan mayores aumentos de temperatura son de noviembre a febrero, esto aplica para ambos escenarios RCP y ambas condiciones de futuro. Adicionalmente, es importante indicar que bajo estas mismas condiciones, este modelo estima aumentos de precipitación durante los meses mencionados, lo cual, vendría entonces a repercutir en el sistema hidrológico pues los aumentos de caudal estimados no van de la mano con los aumentos en la precipitación, lo que hace pensar que la

variable evapotranspiración se verá afectada y aumentada considerablemente. Por otro lado, el GCM CCSM4 estima, para ambos escenarios RCP 4.5 y 8.5, disminuciones de caudal durante todo el año exceptuando el mes de febrero en el caso del futuro cercano, mientras que para el futuro lejano, proyecta disminuciones constantes de caudal durante todo el año sin hacer ninguna diferencia en cuanto a época (seca y/o lluviosa).

A nivel de la proyección del registro de completo de las variables la tendencia positiva es evidentemente apreciable en la Figura 5.11 (a) y Figura 5.12 (a) más no es así para el resto de variables (Figura 5.13 (a), Figura 5.14 (a), Figura 5.15 (a) y Figura 5.16 (a)), lo anterior probablemente debido a que el territorio costarricense se encuentra en zona intertropical donde los períodos secos y lluviosos no son tan estrictamente marcados con en el resto del orbe y constantemente presentan ligeras variaciones dado a que son regiones altamente influenciadas por fenómenos naturales como tornados y tormentas tropicales. Evidencia de lo anterior es que en la actualidad, los datos registrados al mes de julio del año 2017, Costa Rica ha sufrido los efectos de tormentas tropicales en al menos 35 oportunidades.⁴

⁴ Información tomada de: <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio> . Fecha: 18 de agosto del 2017. Hora: 2:45 pm.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.

De acuerdo a los estadísticos de eficiencia obtenidos en el desarrollo del presente proyecto, la calibración realizada para cada una de las cuencas dentro de la región de estudio, se consideran satisfactorias en la mayoría de los casos ($0,7 \geq NSE \geq 0,8$) pues, de existir duda con respecto a la calibración misma, fue posible corroborar los resultados a través de la validación de los sistemas, donde de igual manera, los resultados se consideran satisfactorios para el propósito de esta investigación ($0,7 \geq NSE \geq 0,8$).

Como ya se mencionó anteriormente, al momento de la calibración de las cuencas, se tuvieron algunas dificultades en la zona en la que el registro apenas rondaba los 10 años pues tomando en cuenta que el período de calentamiento del sistema se estableció en dos años, el registro mensual de ocho años fue suficiente para lograr un estadístico de eficiencia adecuado, no obstante, visiblemente las curvas muestran deficiencias. Así las cosas, es importante recalcar la necesidad de contar con períodos continuos de al menos 30 años de cada variable donde se asegure la presencia de los fenómenos climatológicos.

Preliminarmente es importante definir el nivel de detalle y precisión deseado en el estudio. Para el desarrollo de esta investigación se empleó información a escala mensual donde como ya se mencionó, no todas las cuencas contaban con un registro muy extenso y de buenas características.

Todas las cuencas calibradas y simuladas se encuentran en régimen natural y esta es una condición importante para la realización de los análisis de disponibilidad de recurso hídrico. Si bien es cierto durante la validación, sobre todo en lo referente al criterio LNSE, éste empeoró ligeramente, es importante mencionar que aún en este caso las tendencias de las series históricas se mantienen.

La metodología de análisis planteada inicialmente fue exitosa pues se logra una adecuada caracterización del sistema cuenca río Virilla y proyección de variables hidrometeorológicas que cumplen adecuadamente con la estacionalidad de la región.

Se concluye entonces que la caracterización adecuada de la zona de estudio fue posible a partir del empleo del modelo WEAP y que el modelo que cumple de mejor manera el comportamiento de la cuenca del río Virilla definida a la altura de la estación Nuestro Amo es el GCM CCSM4. Lo anterior de acuerdo al análisis realizado en cada una de las variables estudiadas. Además, en la Figura 5.10, es posible observar el efecto de una aplicación adecuada del escalamiento temporal a través de las funciones de transferencia pues se representa a cabalidad la estacionalidad de la región.

En términos generales, tanto a nivel de disminución de precipitación y por consiguiente disminución de caudal, el GCM que independiente de las condiciones de RCP y futuro se presenta como el más crítico es el CCSM4 debido a que estima disminuciones de ambas variables en prácticamente el 95% de los meses. Sin embargo, es importante recalcar que no es hasta en el RCP 8.5 del futuro lejano en el que para el GCM MPI se estiman disminuciones de precipitación que ascienden el 100% del valor durante cuatro meses consecutivos (enero a abril).

En el caso de la temperatura, el escenario más crítico en cuanto aumento de esta variable es el CSIRO_RCP 8.5 con aumentos de hasta 4,4°C en el mes de enero para el futuro lejano y 3,4°C para el mes de noviembre en el caso del futuro cercano.

En el caso de la proyección de caudales, se observa que comparativamente (Figura 5.17) con la el análisis de la línea base, el GCM que reproduce mejor el comportamiento de la curva de variación estacional es el CCSM4 aunque con diferencias considerables sobre todo durante los meses de época lluviosa.

En cuanto a las proyecciones de las variables de caudal y precipitación, estas son correspondientes entre ellas, es decir, cada vez que se presenta un aumento de precipitación, se representa en un aumento de caudal y viceversa. Sin embargo, a nivel de temperatura su tendencia es claramente positiva a lo largo de todo el registro. Lo cual, como ya se mencionó, repercute directamente sobre los otros componentes de los modelos de balance hídrico, en específico favorece el aumento de evapotranspiración.

Finalmente, es especialmente importante destacar que para que el desarrollo de este tipo de investigaciones sea más precisa y confiables se requiere de más y mejor información, principalmente en lo que a variables del tipo nubosidad, temperatura, caudales y precipitación se refiere. En este caso particular, en lo que se refiere a la variable nubosidad, la estimación se llevó a cabo a partir de una deducción indirecta de la misma, la cual se generó a partir algunas mediciones duración real de la insolación. Sin embargo, la información disponible es muy escasa (metodología empleada se detalla en los anexos).

A razón de desarrollar futuras investigaciones sería importante e interesante emplear esta metodología a nivel diario y/o semanal pues a nivel mensual es posible que algunos fenómenos sean absorbidos por la condición promedio mensual y no se evidencien en las proyecciones sin que sean cambios considerablemente cuantiosos.

Bibliografía

Asociación Mundial para el Agua, capítulo Centroamérica (GWP Centroamérica), Programa de Desarrollo de Zonas Fronterizas en América Central (ZONAF), Unión Europea (UE) y el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE). (2011). Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica. Hacia una Gestión Integrada. Tegucigalpa, Honduras.

Barrantes, G., Jiménez, L., Maldonado, T. (2004). Disponibilidad del recurso hídrico y sus implicaciones para el desarrollo en Costa Rica. Undécimo informe sobre el Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible. San José, Costa Rica.

Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C. y Vásquez, A, (1996). Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos. Centro de Investigaciones en Desarrollo Sostenible (CIEDES). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

Cepeda, J. (2017). Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río olivares: comparación entre el modelo DHSVM y WEAP. Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Collier, M.A., Jeffrey, S.J., Rotstayn, L.D., Wong, K.K-H., Dravitzki, S. M., Moeseneder, C., Hamalainen, C., Syktus, J.I., Suppiah, R., Antony, J., El Zein, A. and Atif, M. (2011). The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication. 19th International Congress on Modelling and Simulation. Perth, Australia.

Delgadillo, A. y Páez, G., (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. En: Ferrer, C y Dugarte, M. (editores). Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del Valle de Mocotíes. Programa de las Naciones Unidas para el

Desarrollo (PNUD) – Fundación para la prevención de los Riesgos del estado Mérida (FUNDAPRIS). Mérida, Venezuela.

Denyer, P. y Arias, O., (1990). Geología de la hoja Abra. Mapa a escala 1:50000. Instituto Geográfico Nacional. San José, Costa Rica.

Denyer, P. y Arias, O., (1991). Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Edición 12: 1-59 págs.

Figueroa, R. (2008). Efectos del Cambio Climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca: Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas.

Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., Martinez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology. Págs 80 – 91 (377).

Hernández, J., (1994). Caracterización geológica-geotécnica del deslizamiento El Burío. Cantón de Aserrí. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.

Hernández, K. (2013). Estudio de evaporación en Costa Rica y su aplicación para determinar el inicio y conclusión de la época seca y lluviosa. Tesis de grado para optar al título de Licenciado en Meteorología. Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Hernando, L., Ruiz, A., Solís, K. (2012). Disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Segundo. Región Central de Costa Rica. Revista Geográfica de América Central. Nº 48, Pp. 117-132.

Heuminski, A. M. (2007). Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC. Revista interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp. <http://www.multiciencia.unicamp.br/>

Instituto Geográfico Nacional (2005). División Territorial Administrativa de la República de Costa Rica. Comisión Nacional de División Territorial Administrativa. San José, Costa Rica.

Jiménez, R., Amit, R., Vindas, R. (2011). Políticas de cambio climático en Costa Rica, integrando esfuerzos para asumir los retos. Centro de Investigación en cultura y desarrollo. Vicerrectoría de Investigación. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.

Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425. Pp 264 – 277.

Li, H., Sheffield, J., Wood, E. F. (2010). Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, M., Chandler, E., Kendon, J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V., Chun, K., Goodess, C., Jones, R., Onof, C., Vrac, M., Thiele - Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under Climate Change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48, RG3003. Pp 1-34.

Ministerio del Ambiente Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH) Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2008). Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. San José, Costa Rica.

Morales, Y. (2016). Evaluación y modelación de información hidrológica para propuesta de mejoras en la programación a largo plazo de Centrales hidroeléctricas en Chile. Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol 50, pp. 885-900.

Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles". Journal of Hydrology. 10 (3): 282–290. doi:10.1016/0022-694(70)90255-6.

Pérez, J., 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. 01-38 págs.

Perkins, S. (2011). A Simple bias correction method for climate extremes estimated by the generalized extreme value distribution. IUGG 2011 General Assembly (28 de junio al 7 de julio). Melbourne, Australia.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). (2004). Cambio Climático, Carpeta de Información. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Suiza.

Racca J., (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 77(1-2): 31-38. Rosario, Argentina.

Schosinsky, G. y Vargas, A., (2001). Hidrogeología de un sector de la margen izquierda del río Virilla, provincia de San José, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Edición 24: 93-102 págs.

Sheffield, J., Goteti, G., and Wood, E., (2006). Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling, J. Climate, 19 (13), 3088-3111.

Strahler, A. (1952). Hypsometric (area - altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America. Vol. 63, pp. 1117 – 1142.

Thiessen, A.H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Mon. Weather Rev.* 39, 1082–1089.

Vargas, X., Ayala, A., Meza, R., Rubio, E., (2012). Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. Publicación de las Naciones Unidas. Santiago, Chile.

Vörosmary, C., Salisbury, J., (2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *SCIENCE Magazine*. Volume 289. Pp 284-288.

Anexos

A.1. Funciones de transferencia (Digital)

A.2. Metodología de estimación de nubosidad

Debe calcularse la distancia relativa Sol – Tierra (dr), a partir de la siguiente ecuación,

$$dr(m) = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right)$$

Ec. A2.1

donde,

J : Día juliano.

Posteriormente, se calcula la declinación solar (δ)

$$\delta(rad) = 0.4093 \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1.405\right)$$

Ec. A2.2

donde,

J : Día juliano.

Seguidamente, es necesario realizar el cálculo del ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol (ω_s), a partir de,

$$\omega_s(rad) = \text{arcos}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))$$

Ec. A2.3

donde,

φ : latitud.

Para finalmente calcular la duración máxima de insolación (N), utilizando el cálculo anterior,

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s$$

Ec. A2.4

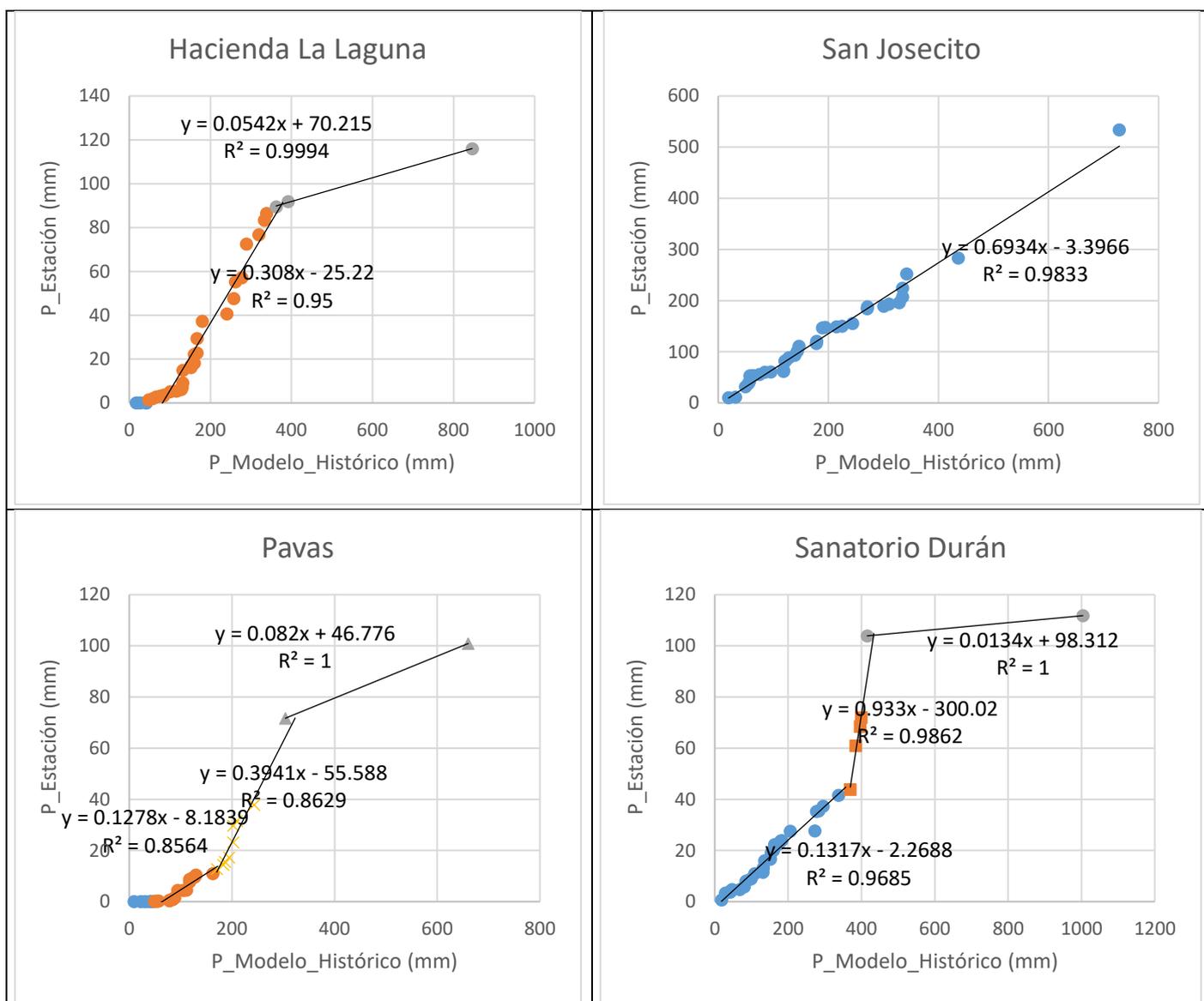
Finalmente, dado que se cuenta con información de estaciones meteorológicas de la variable de duración real de la insolación (n), entonces se realiza el cálculo del cociente n/N a utilizar para los fines deseados como estimación de la nubosidad.

A.1. Funciones de transferencia (Digital)

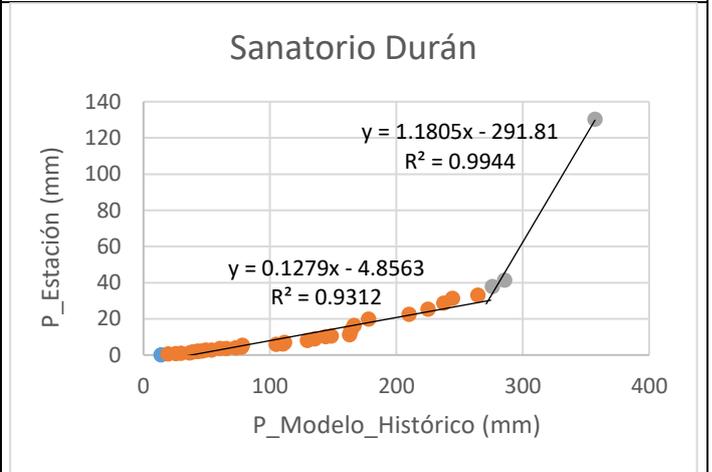
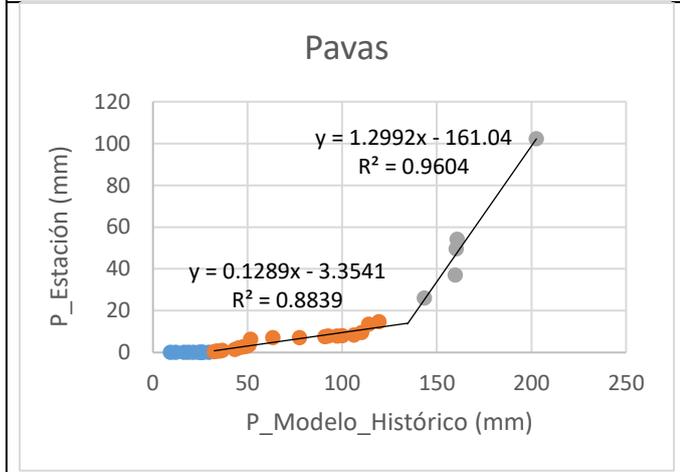
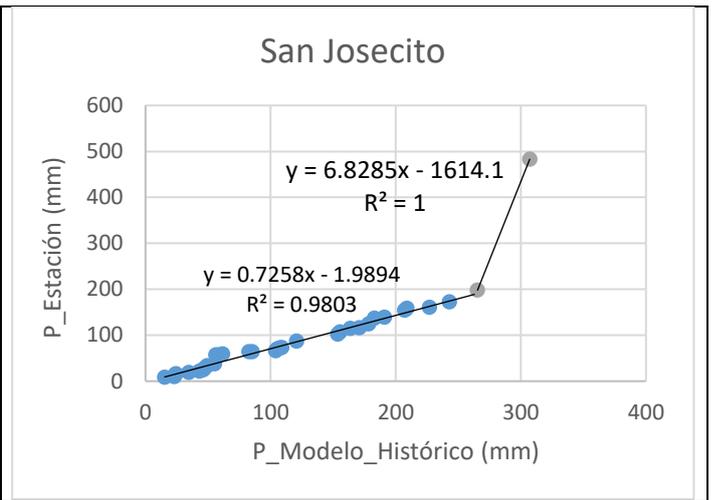
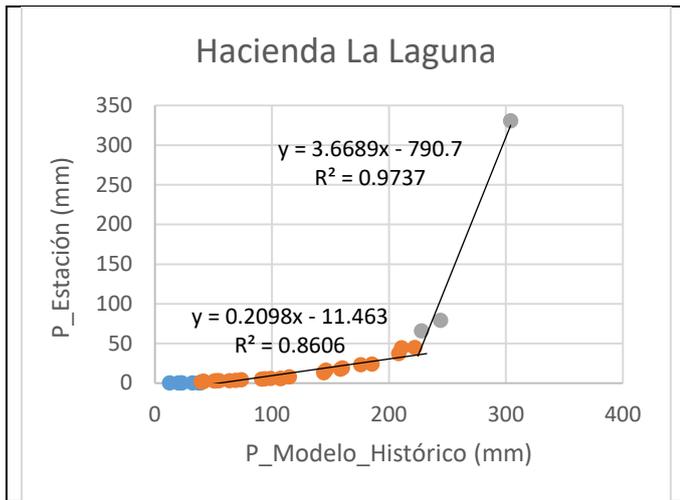
A.1.1. Modelo CCSM4

A.1.1.1. Precipitación

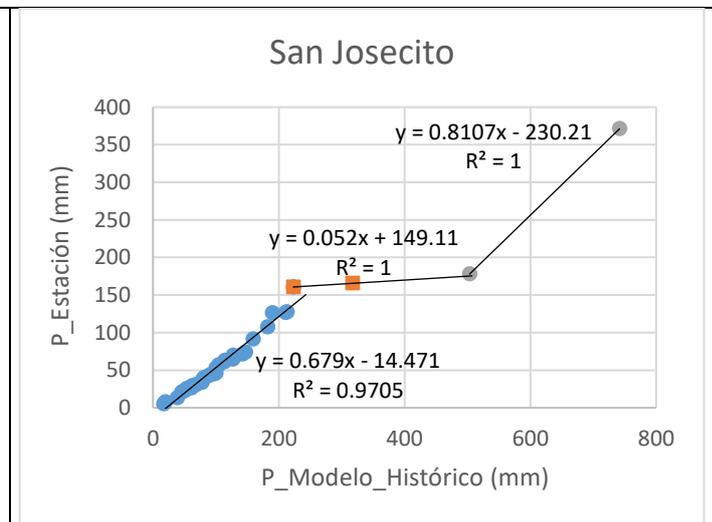
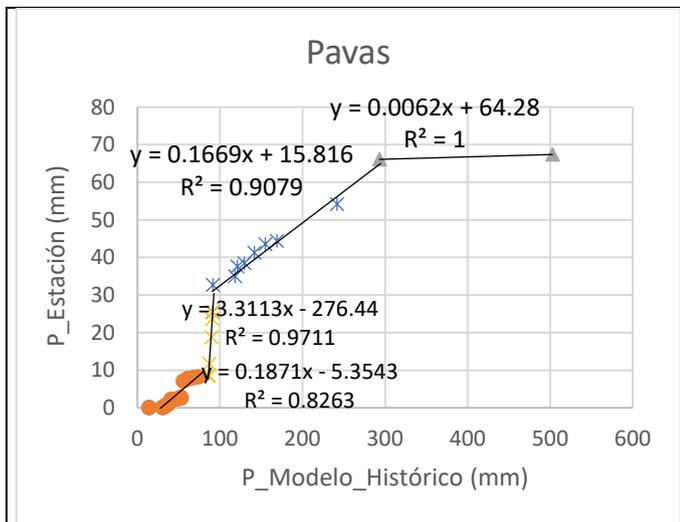
Enero

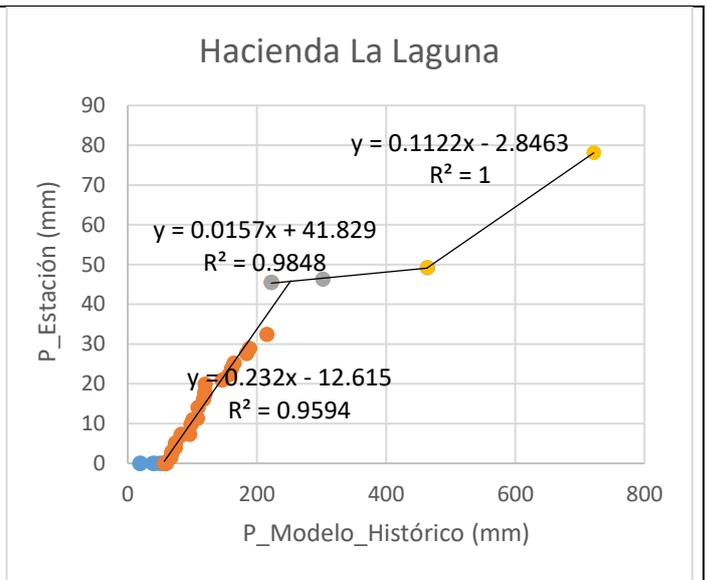
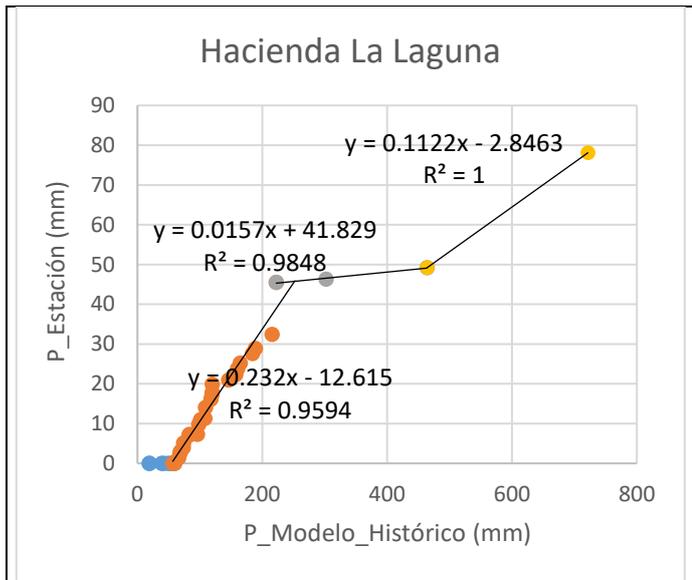


Febrero

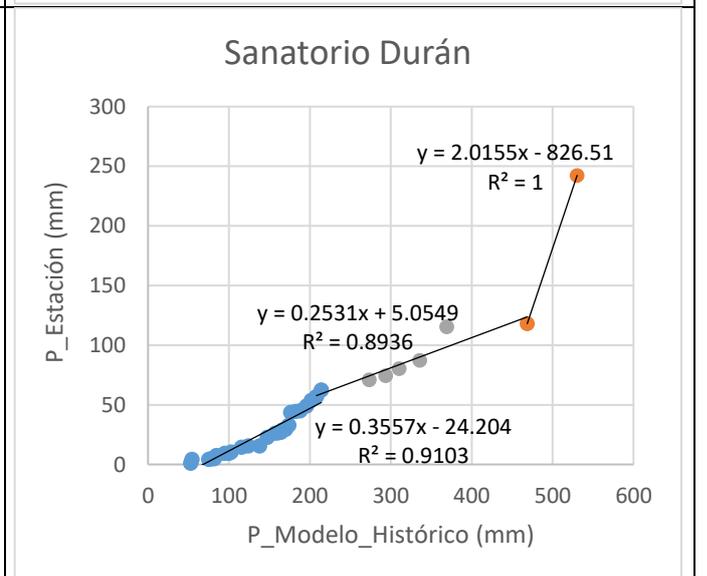
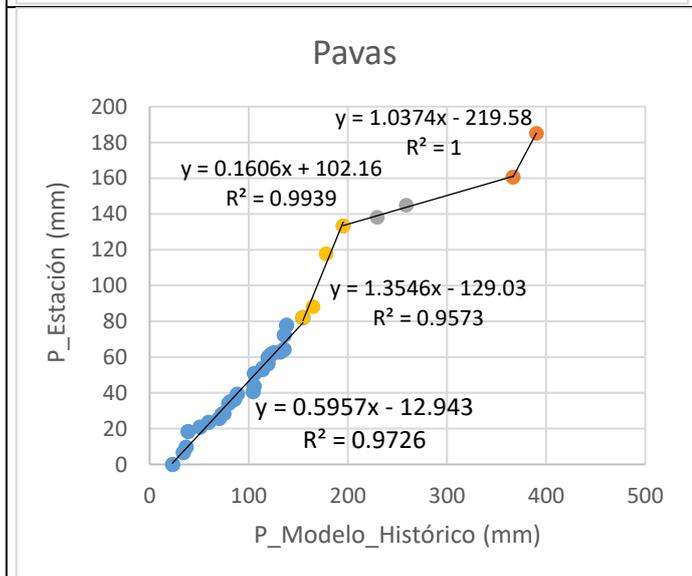
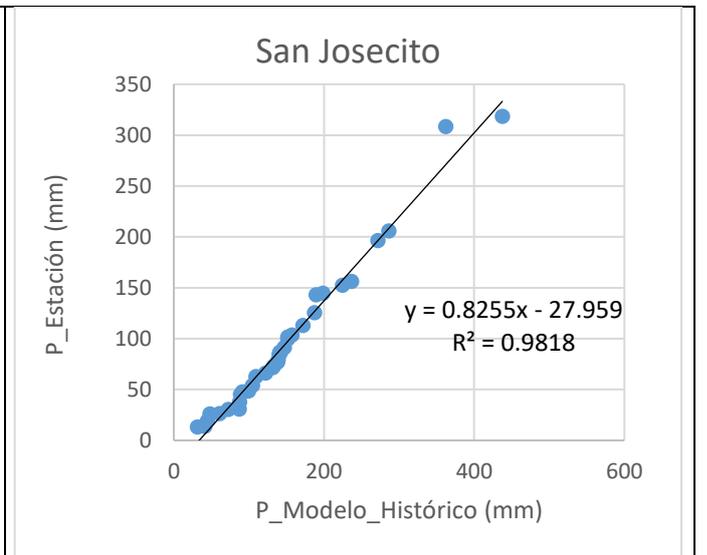
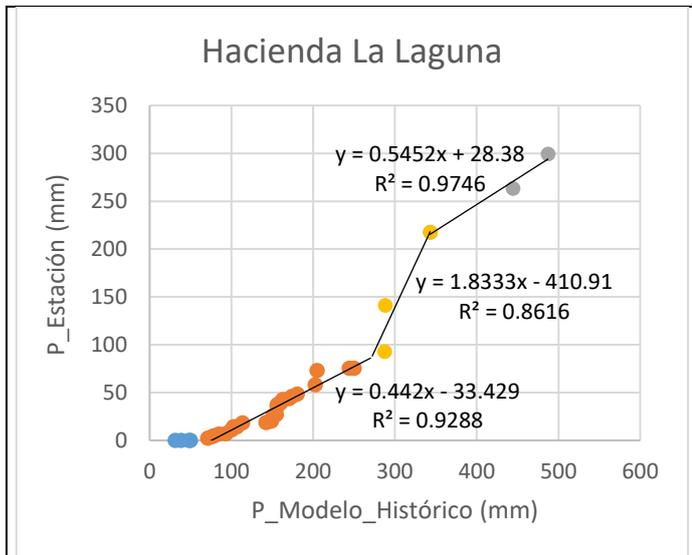


Marzo

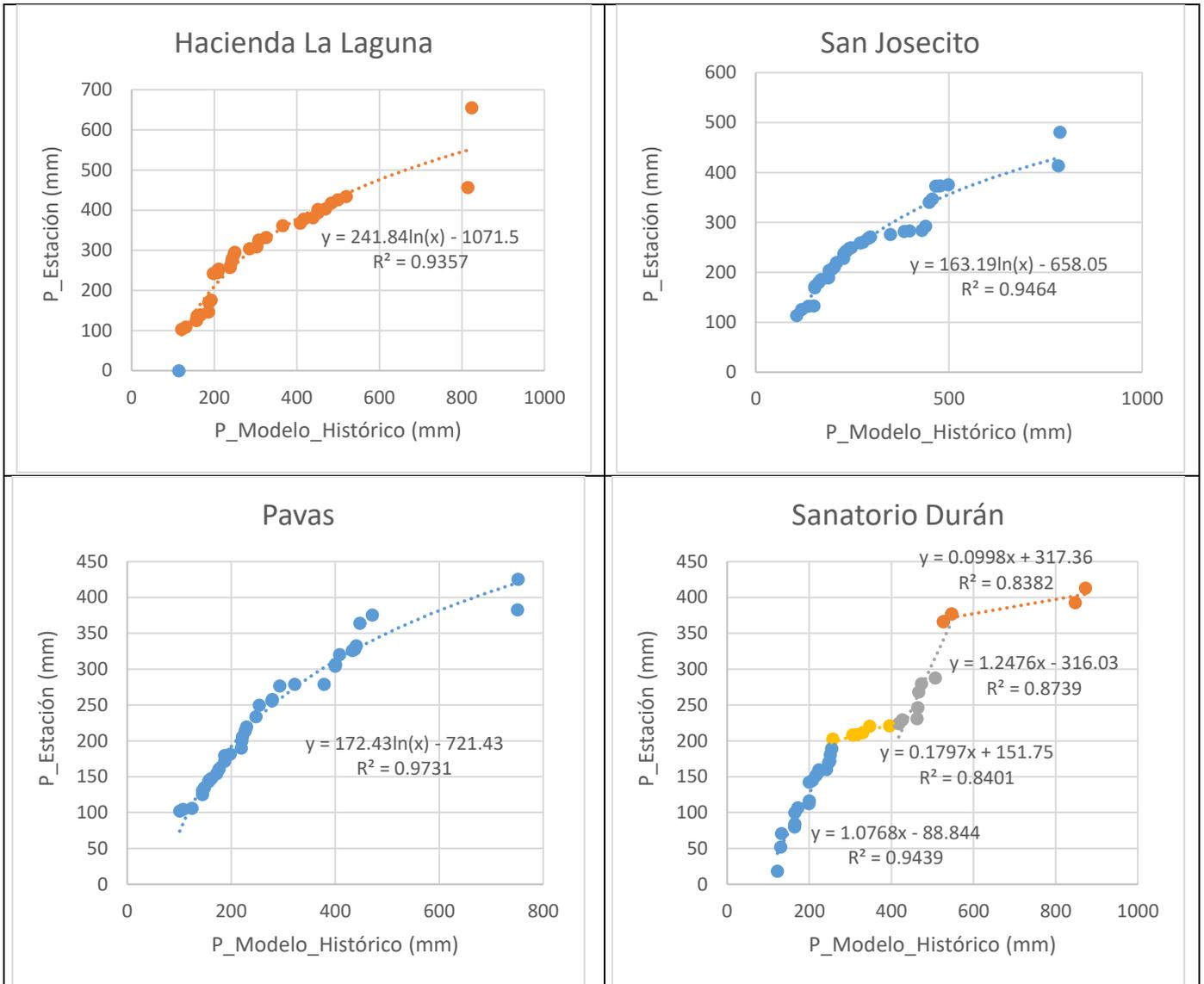




Abril

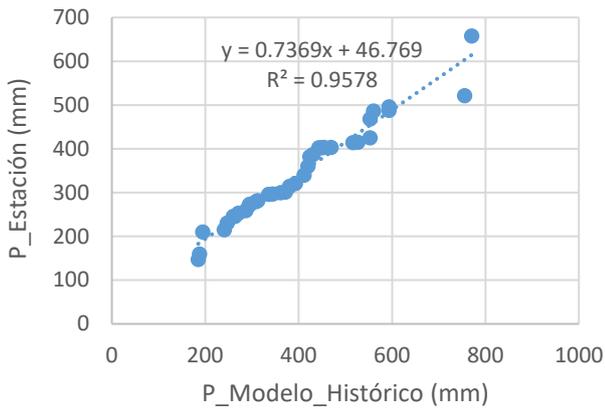


Mayo

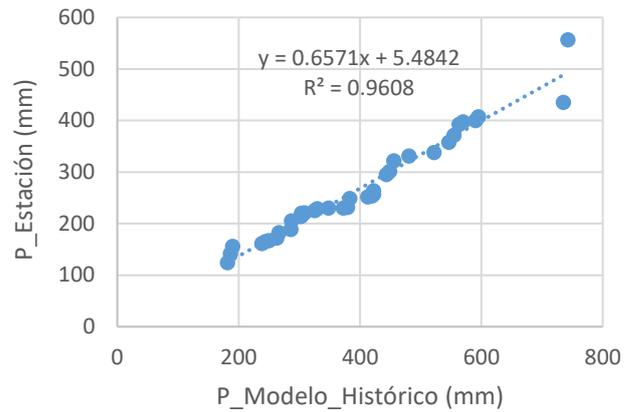


Junio

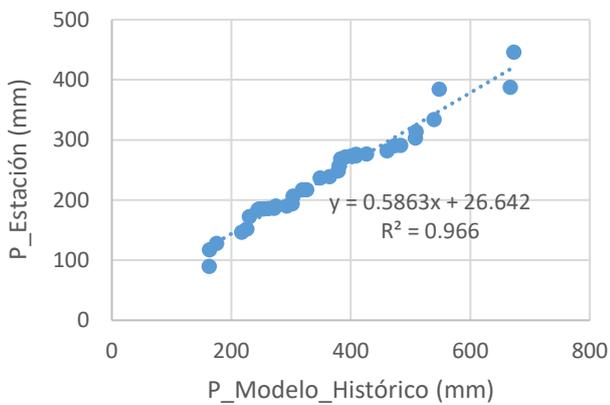
Hacienda La Laguna



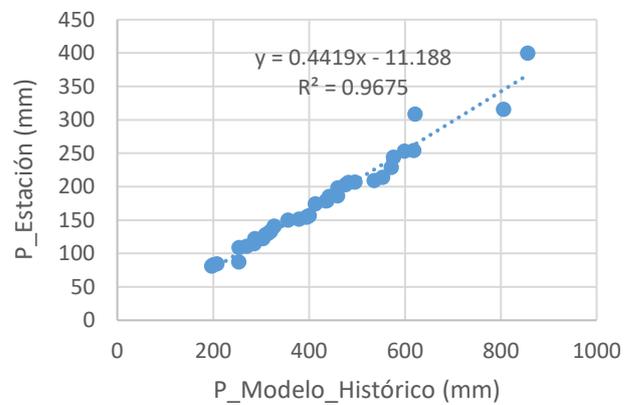
San Josecito



Pavas

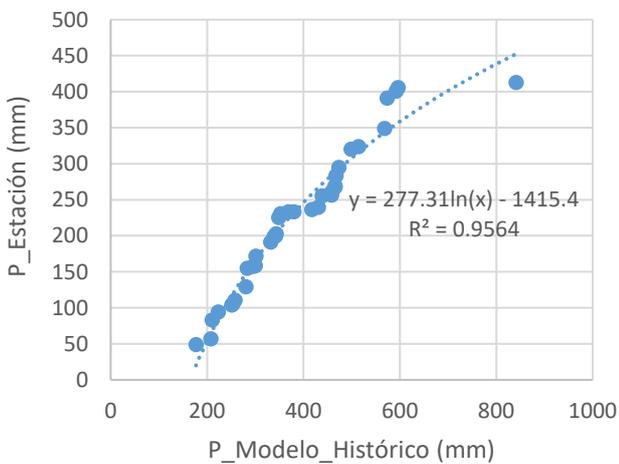


Sanatorio Durán

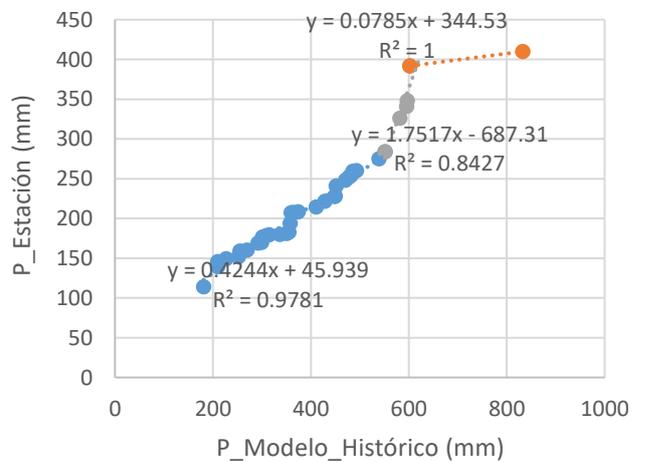


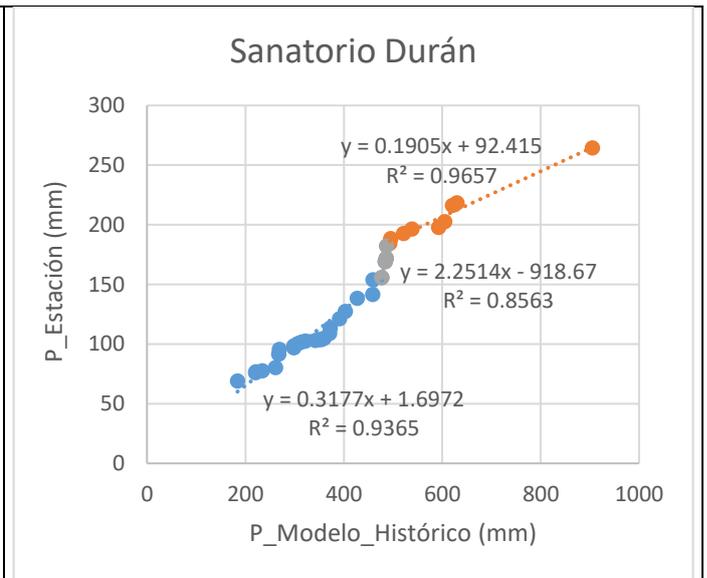
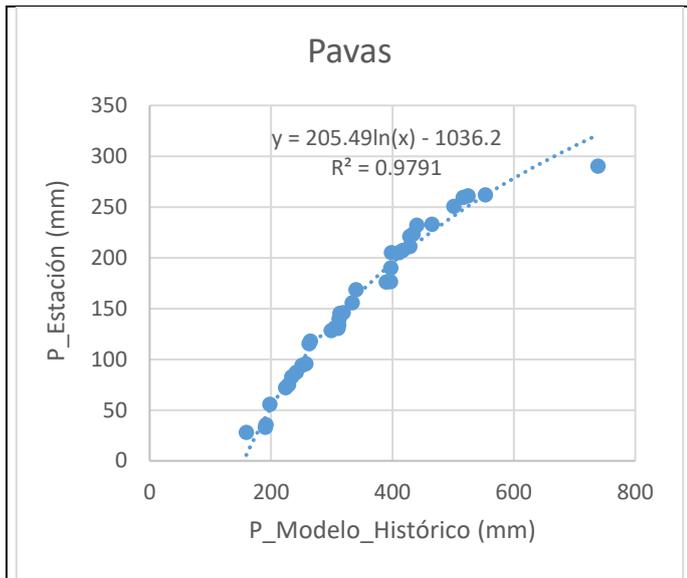
Julio

Hacienda La Laguna

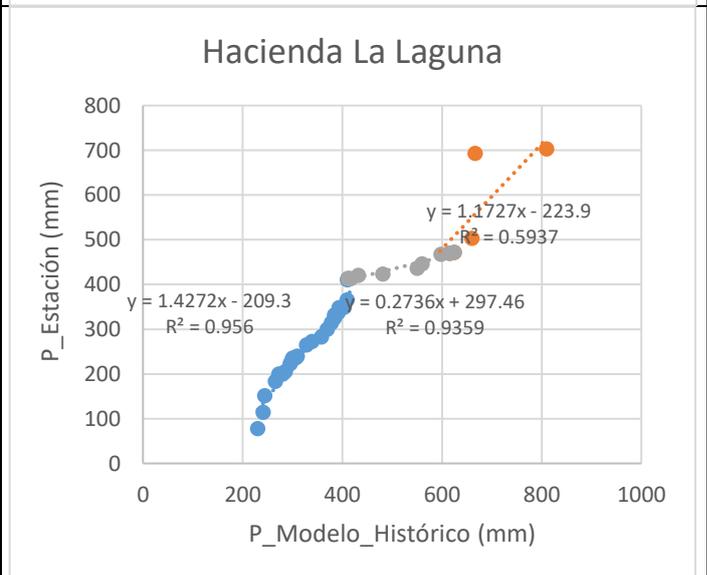
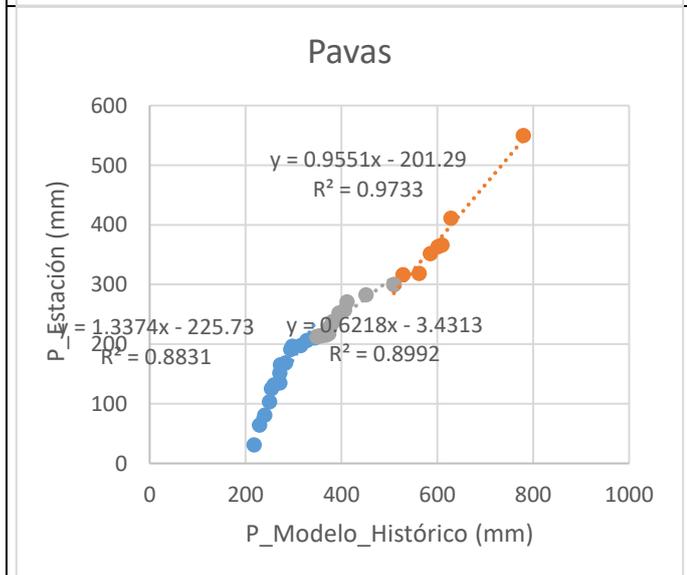
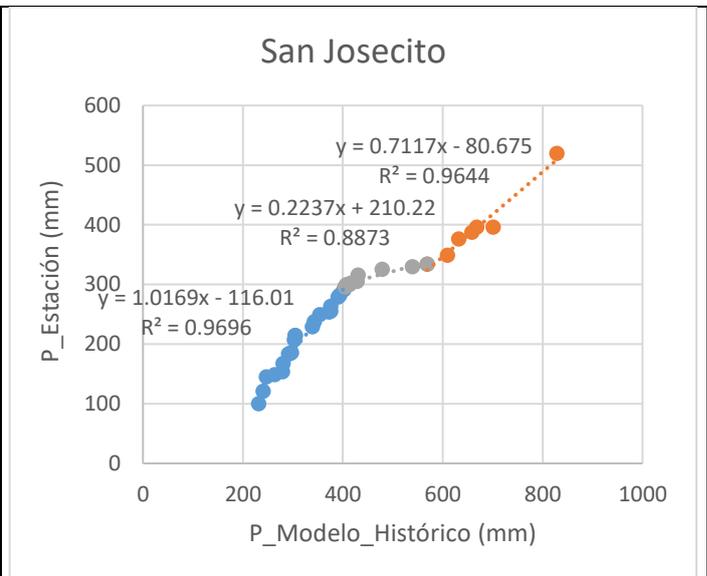
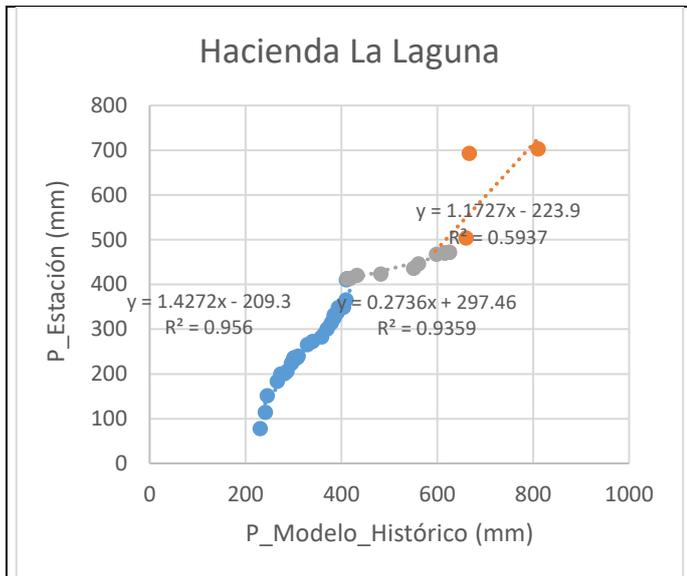


San Josecito

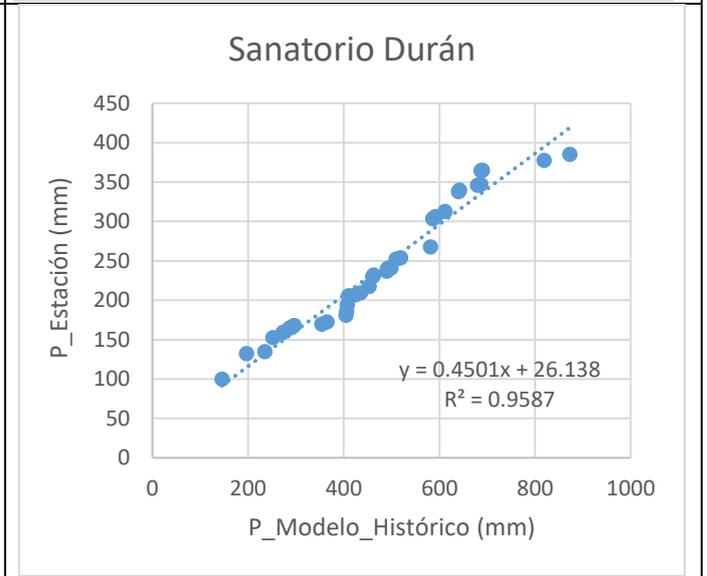
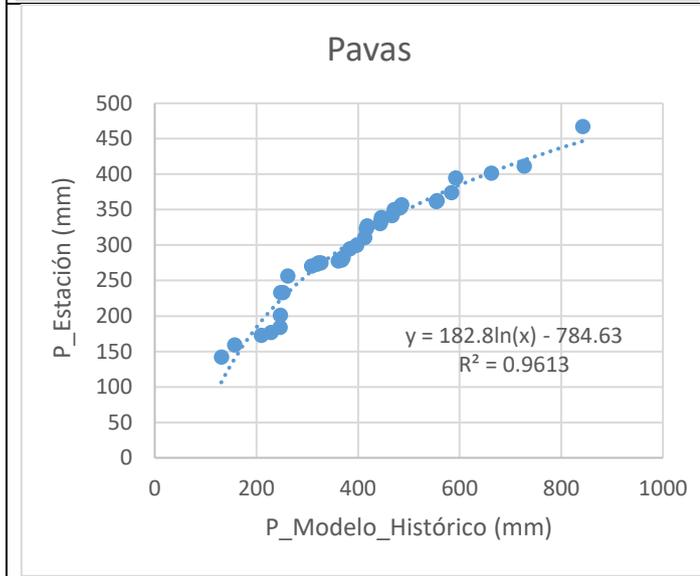
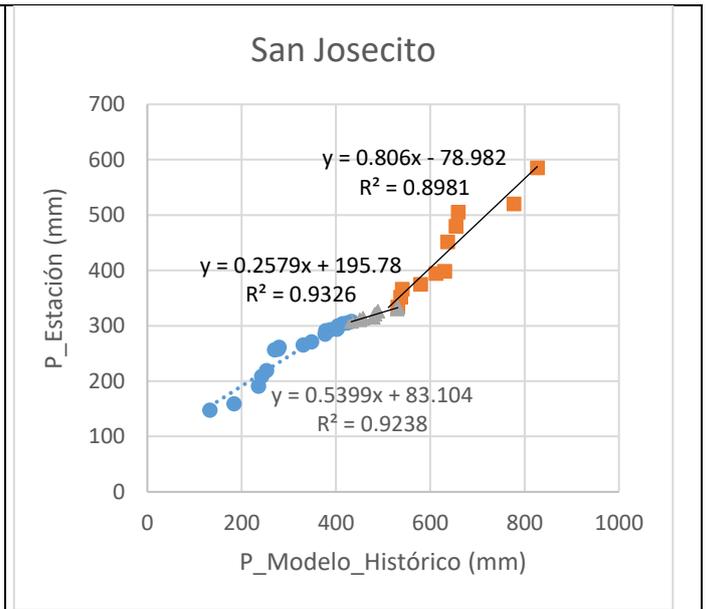
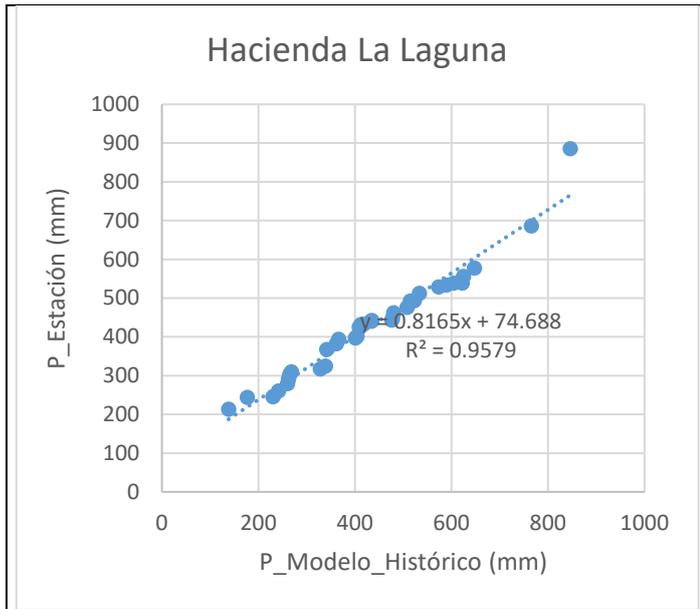




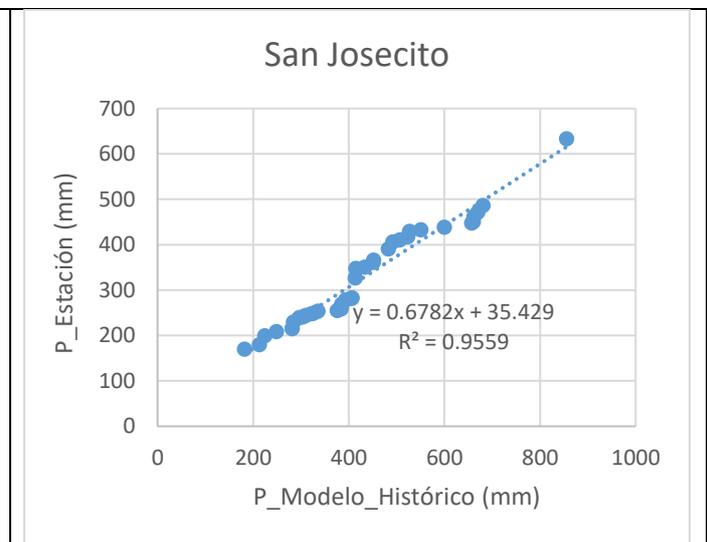
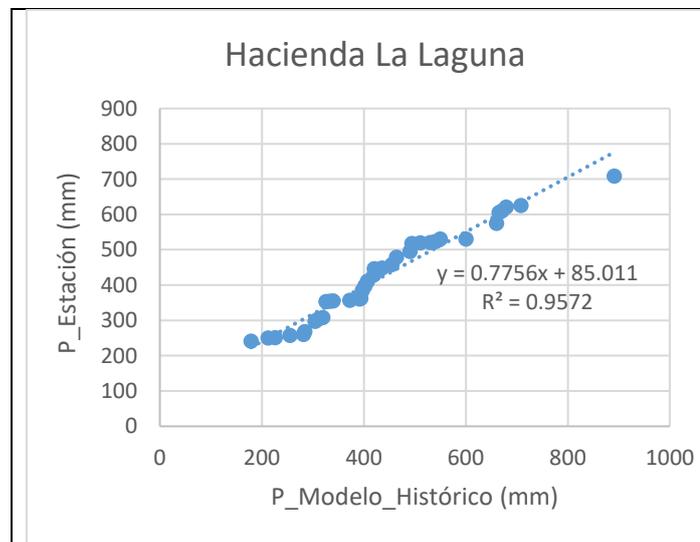
Agosto

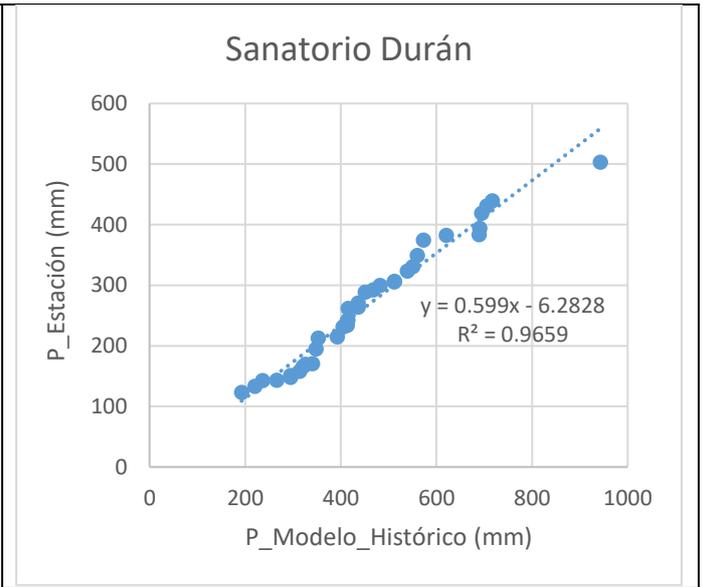
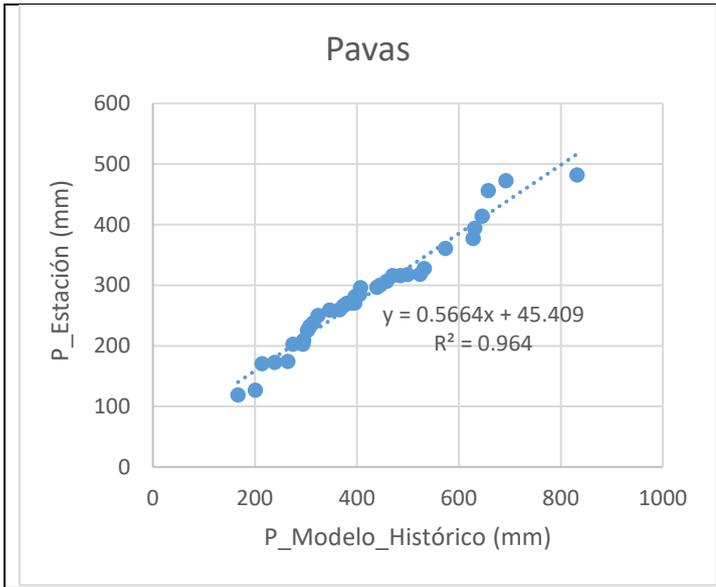


Septiembre

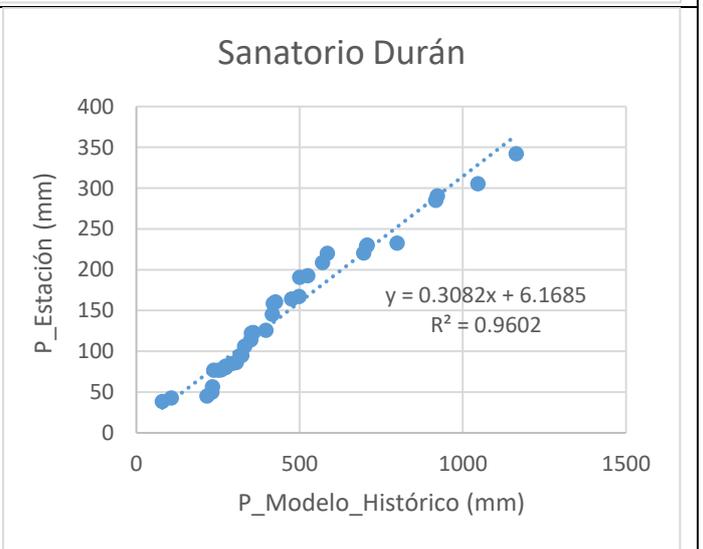
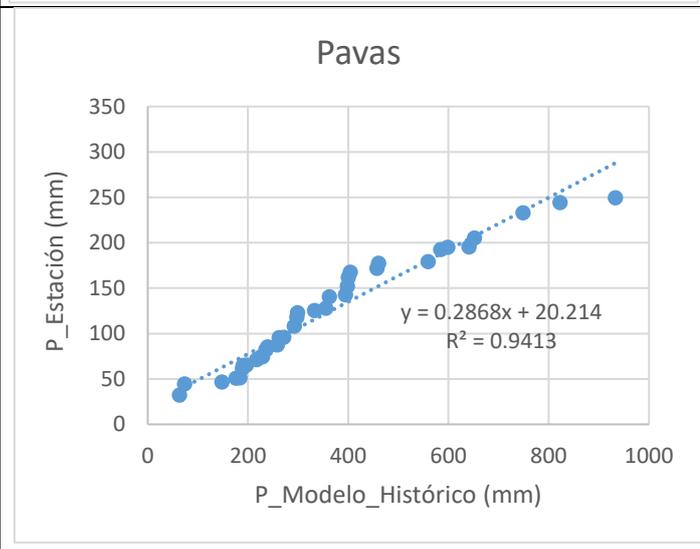
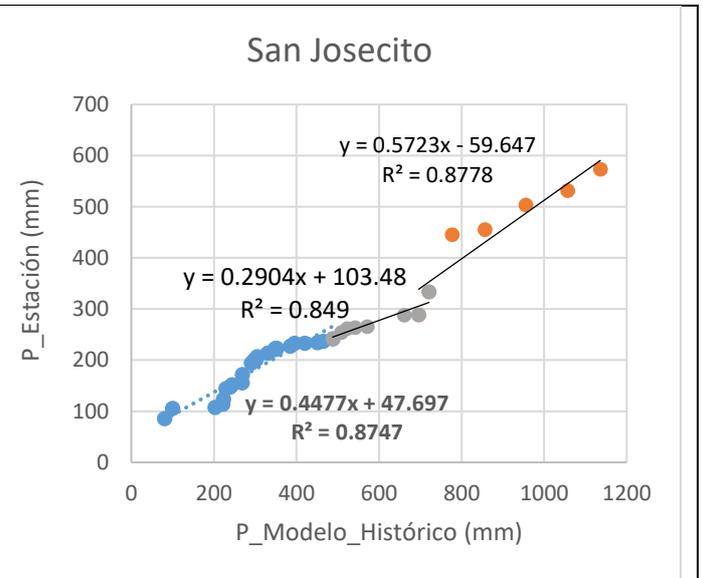
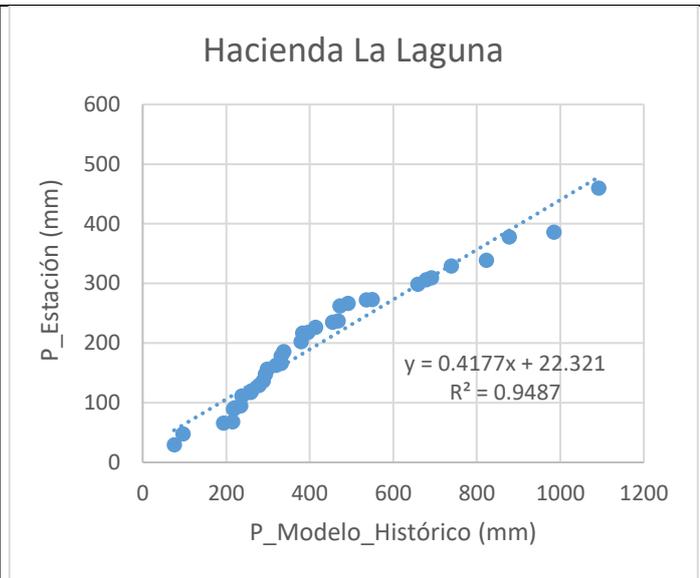


Octubre

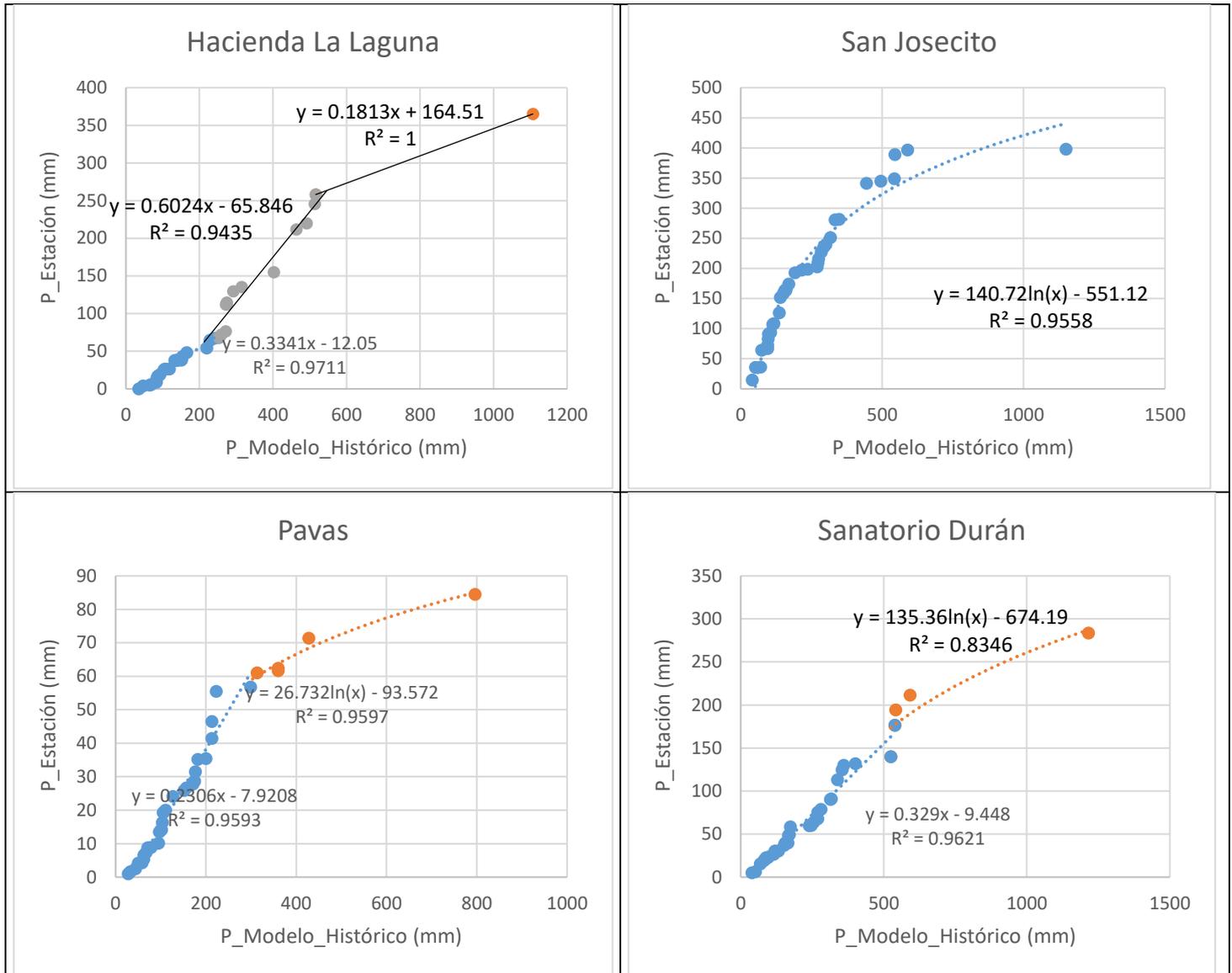




Noviembre

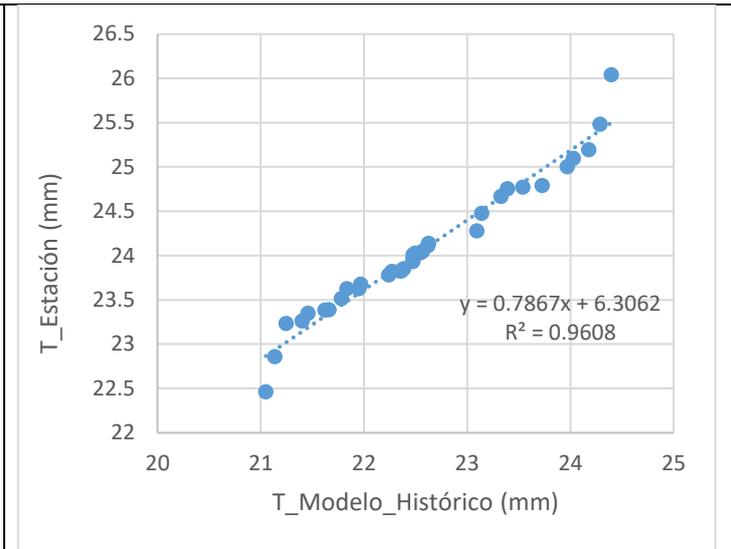
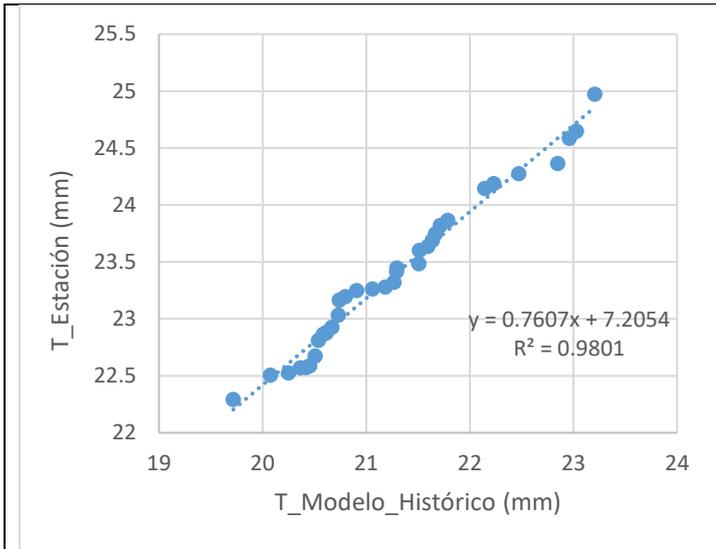


Diciembre



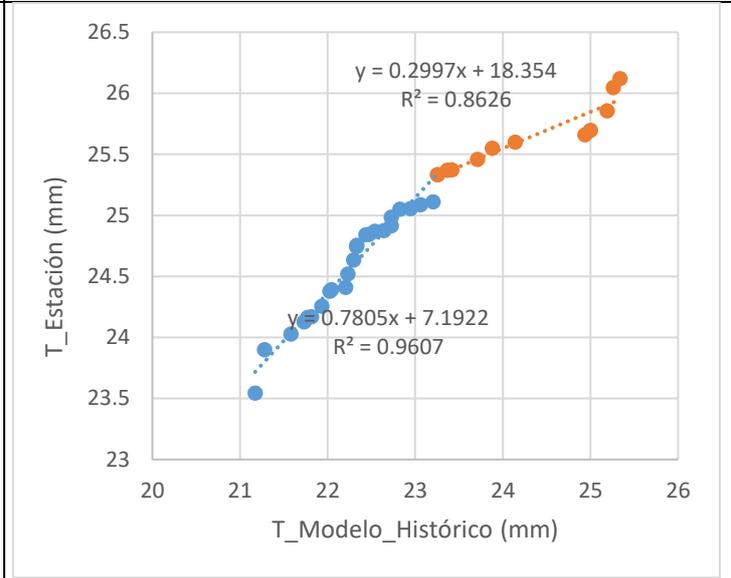
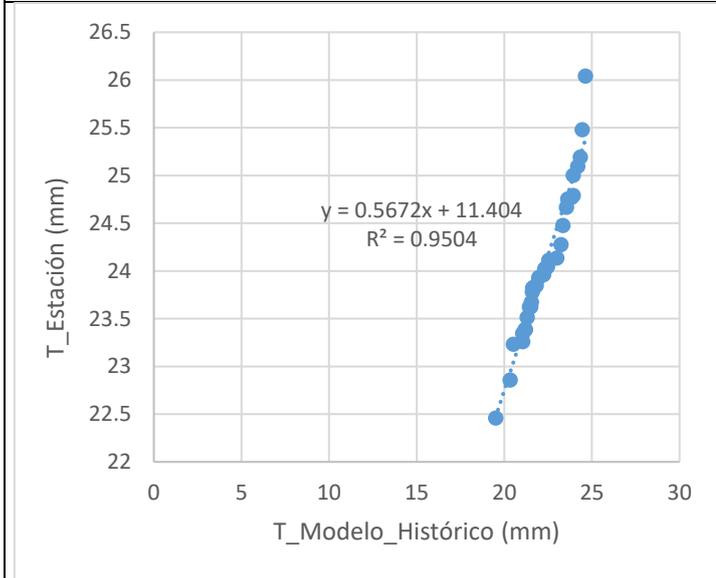
A.1.1.2. Temperatura

Enero	Febrero
-------	---------



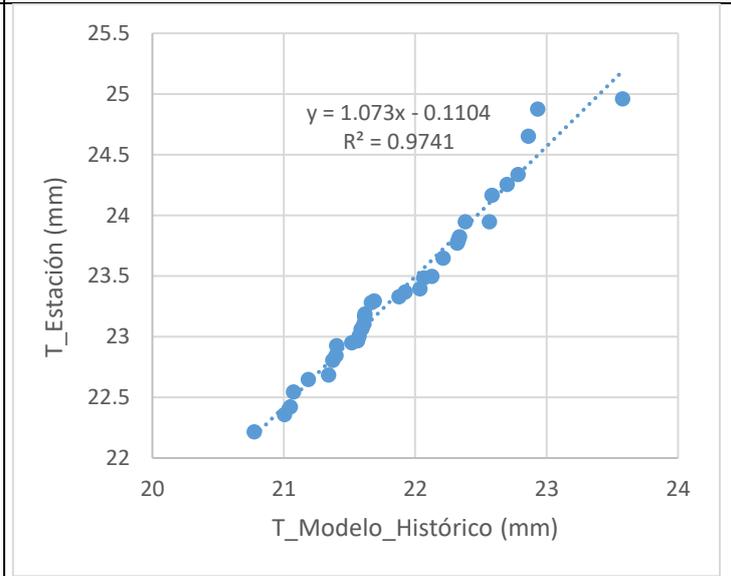
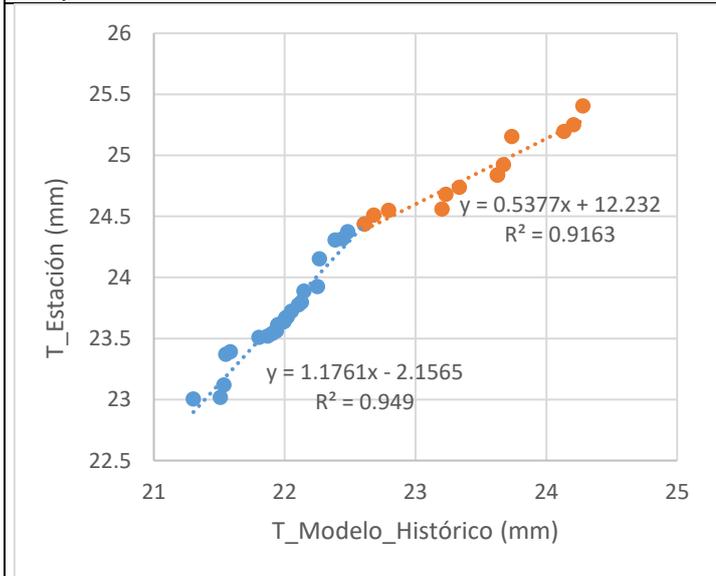
Marzo

Abril



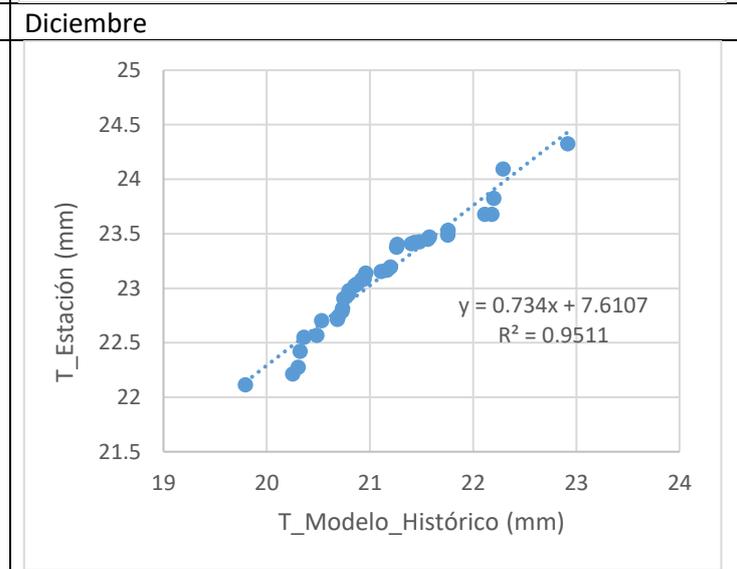
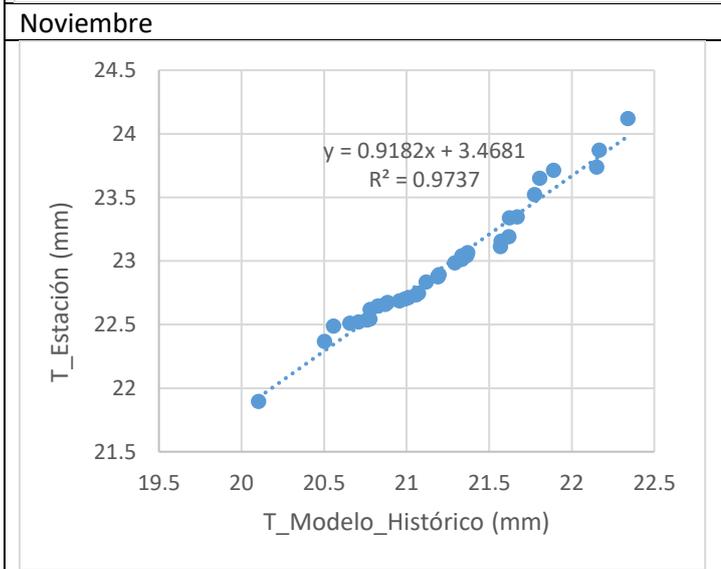
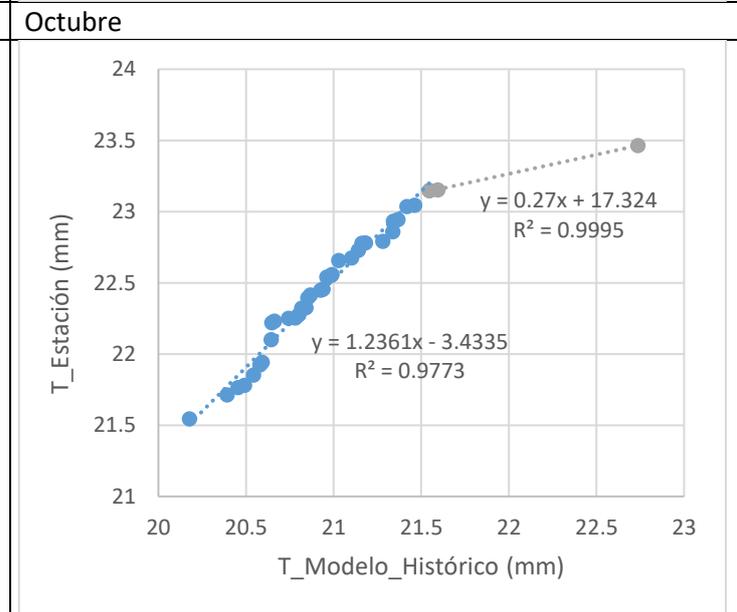
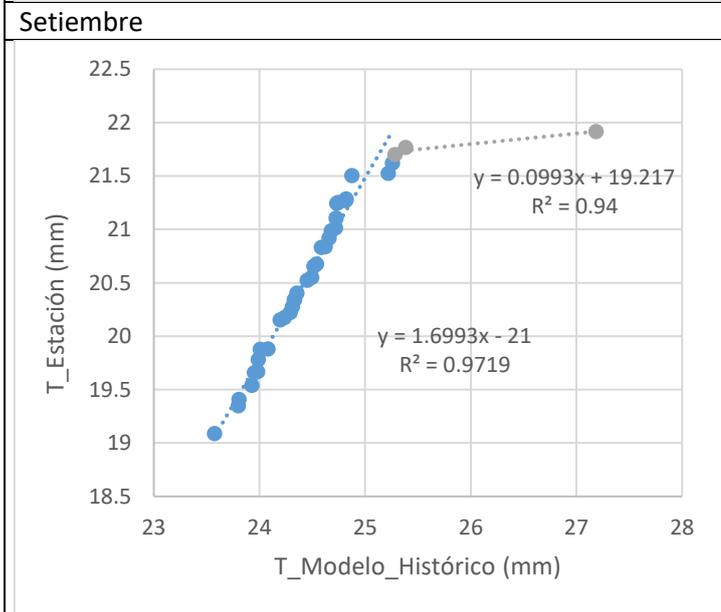
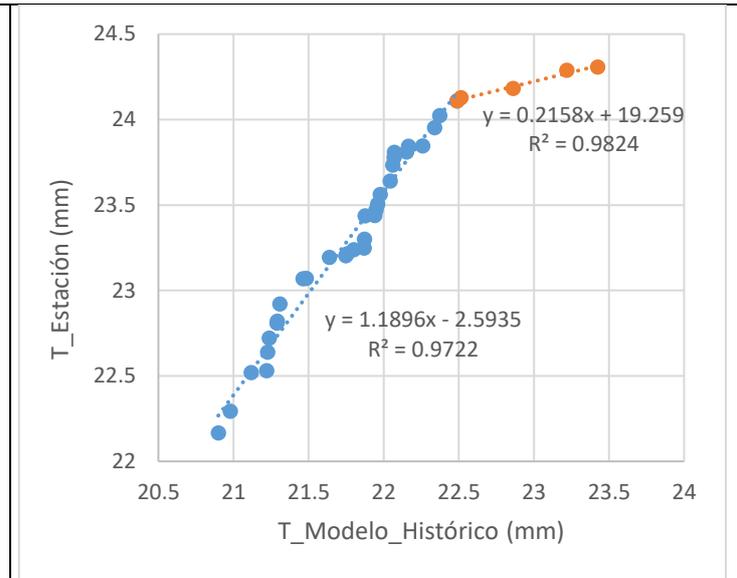
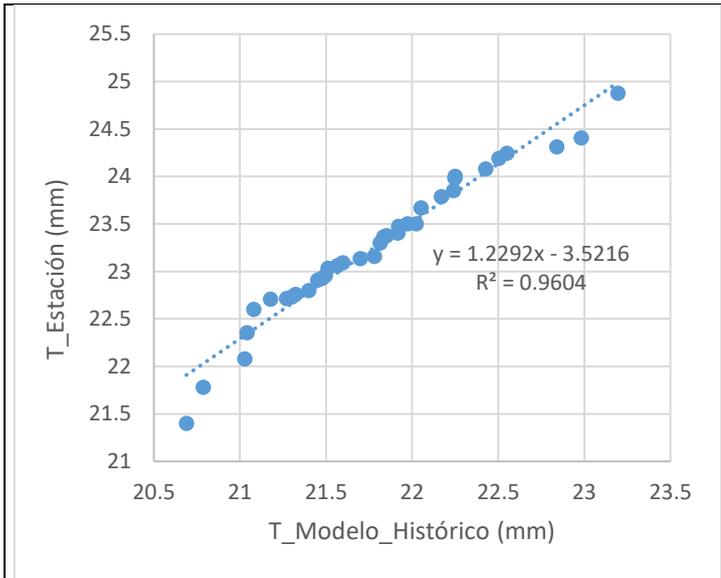
Mayo

Junio



Julio

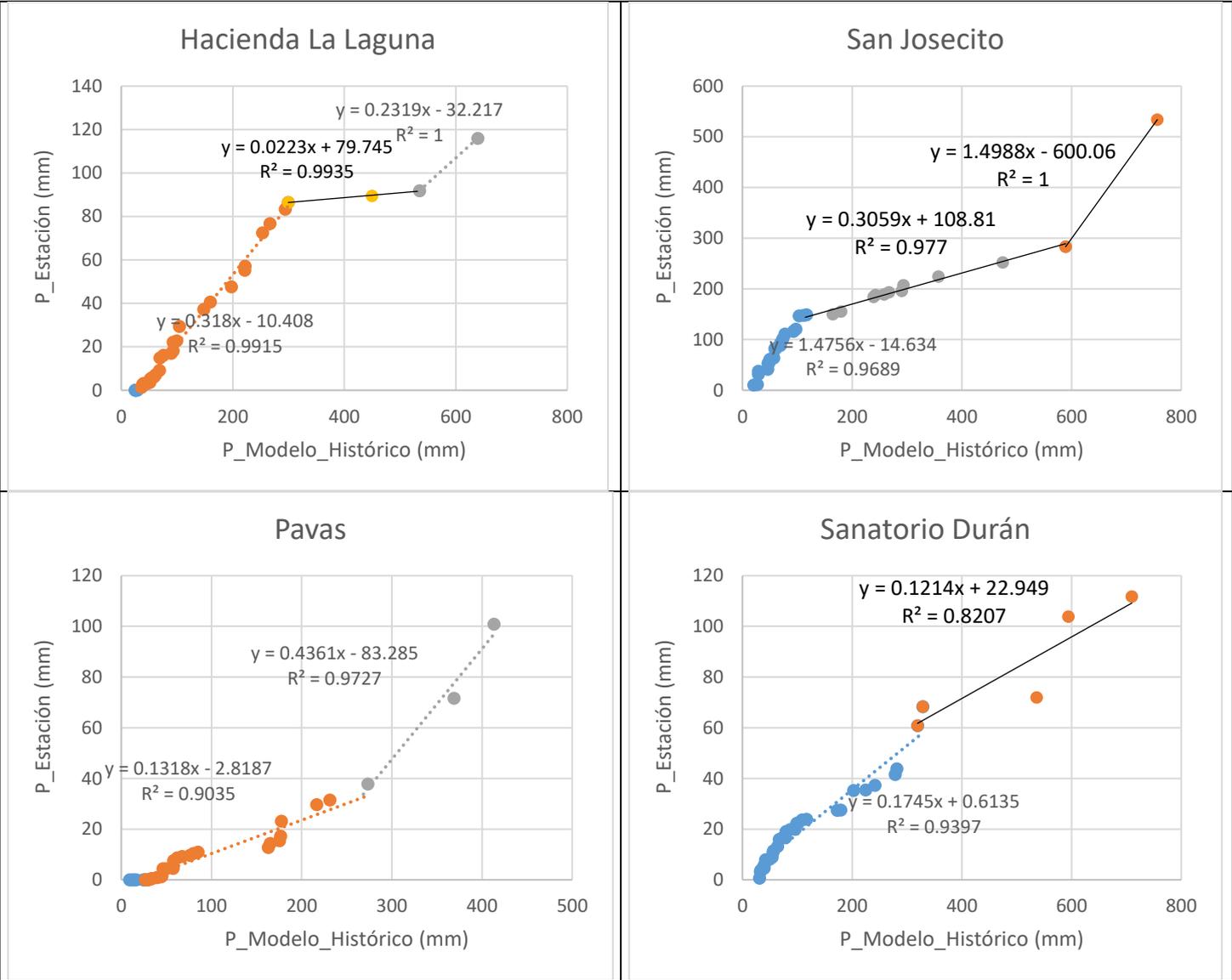
Agosto



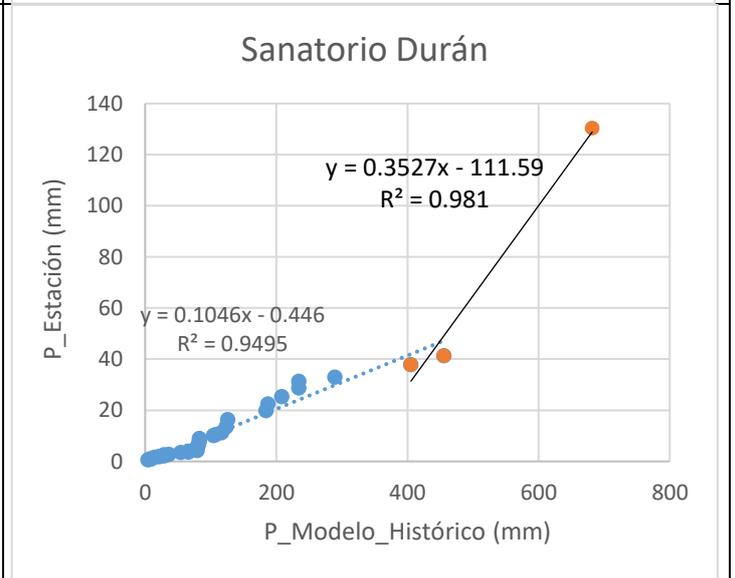
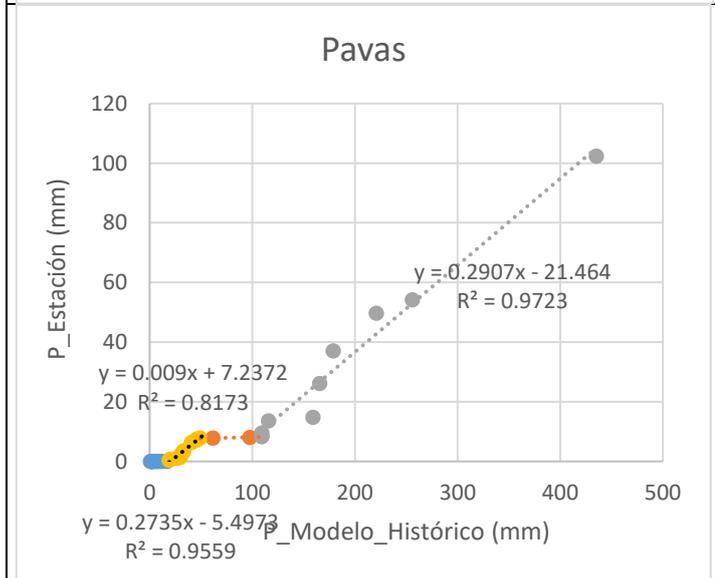
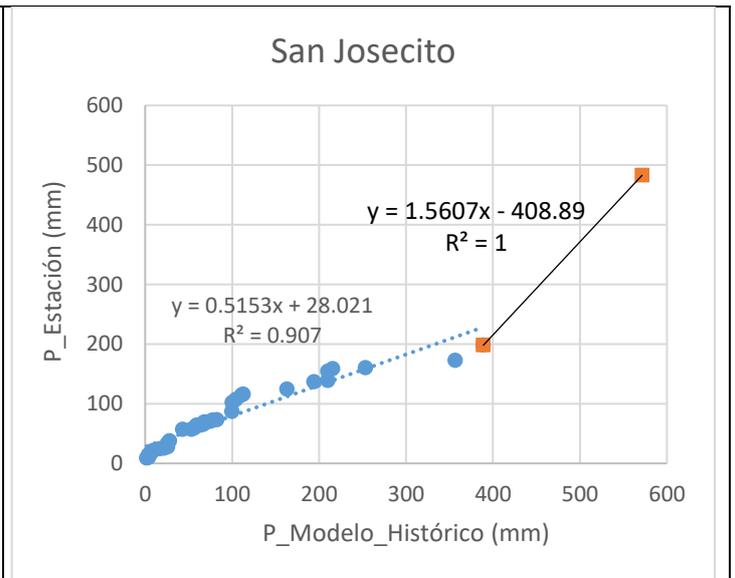
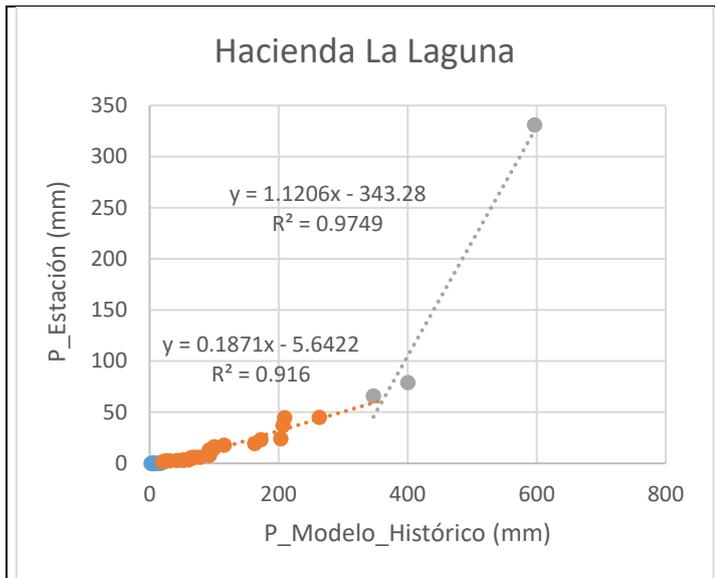
A.1.2. Modelo CSIRO

A.1.2.1. Precipitación

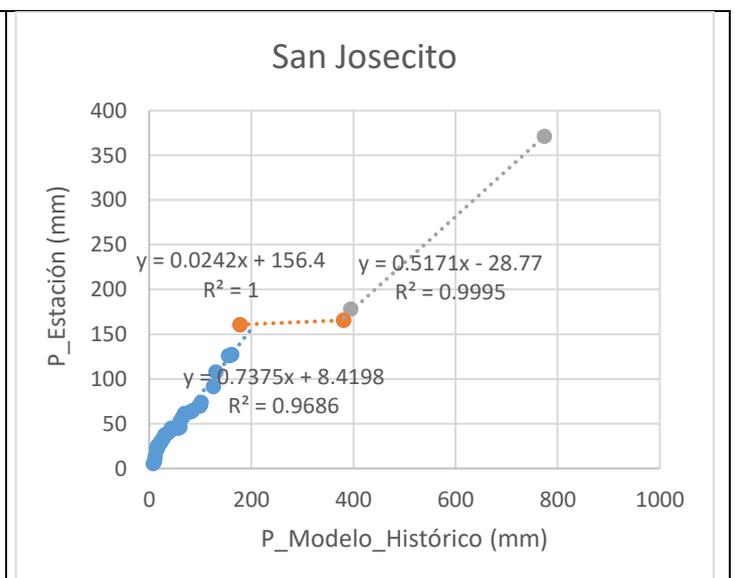
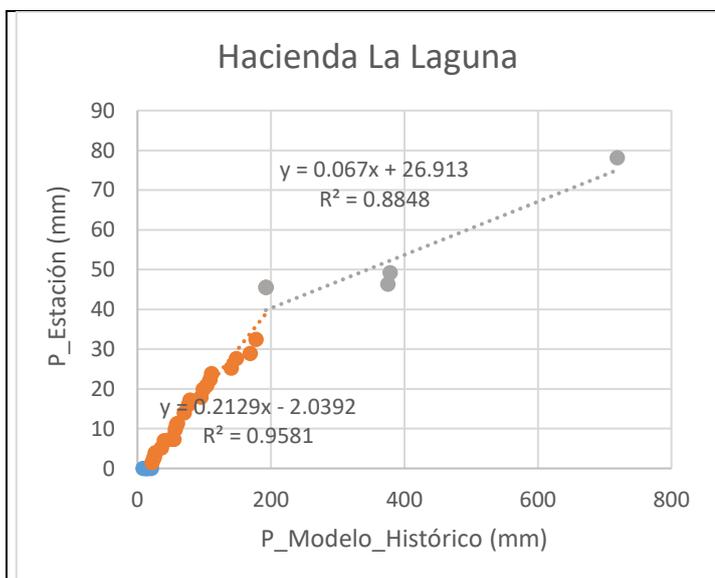
Enero

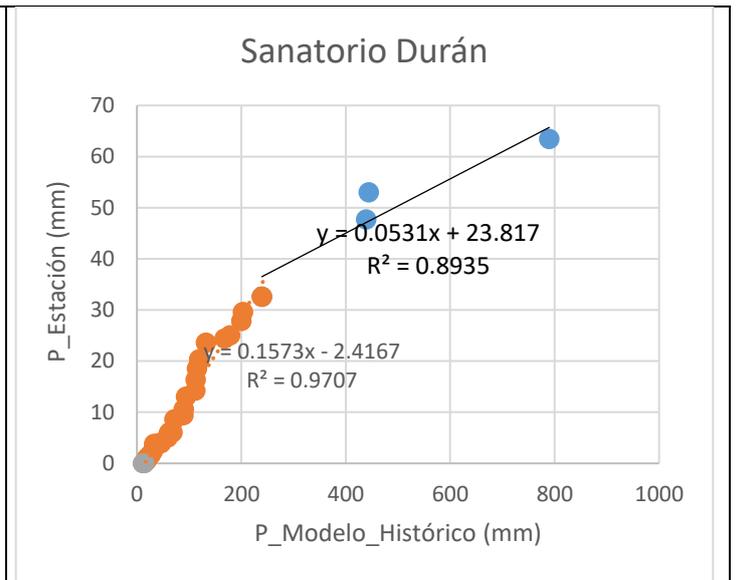
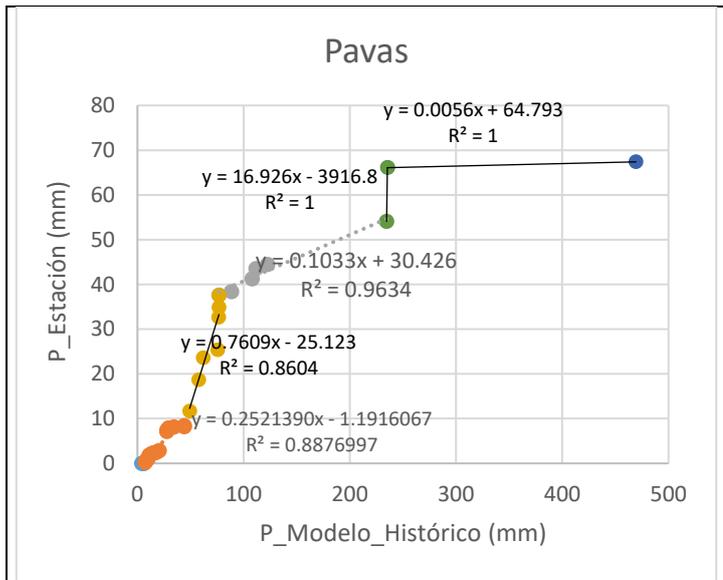


Febrero

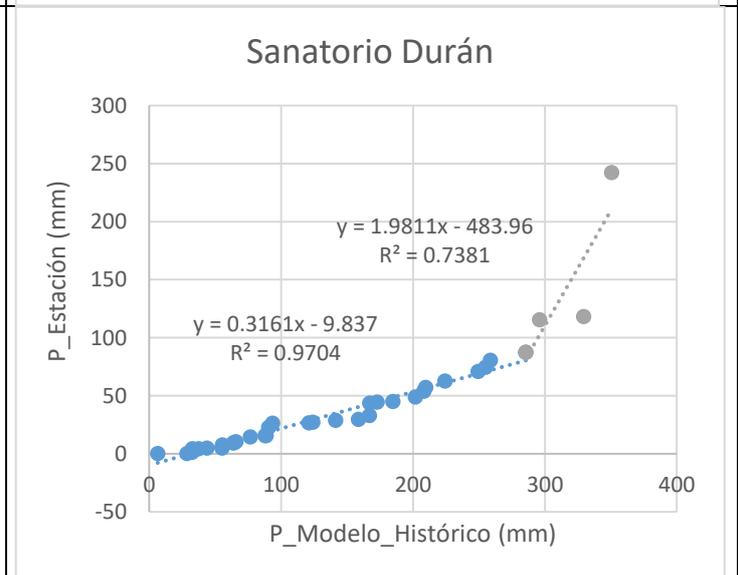
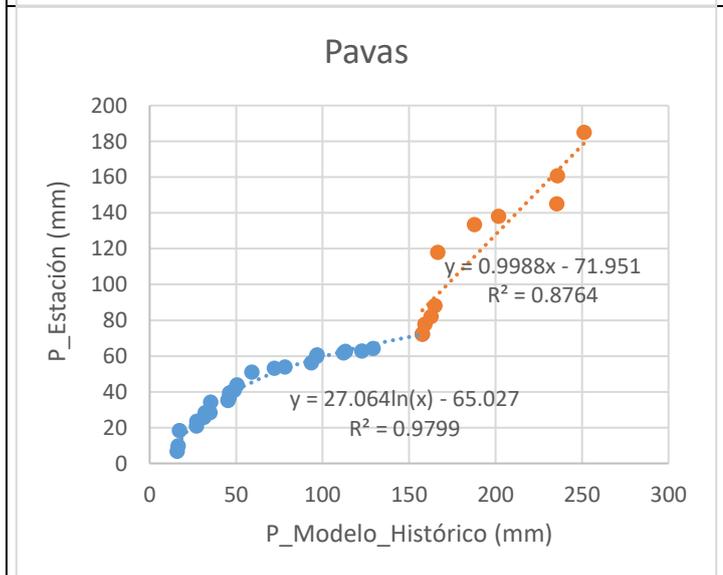
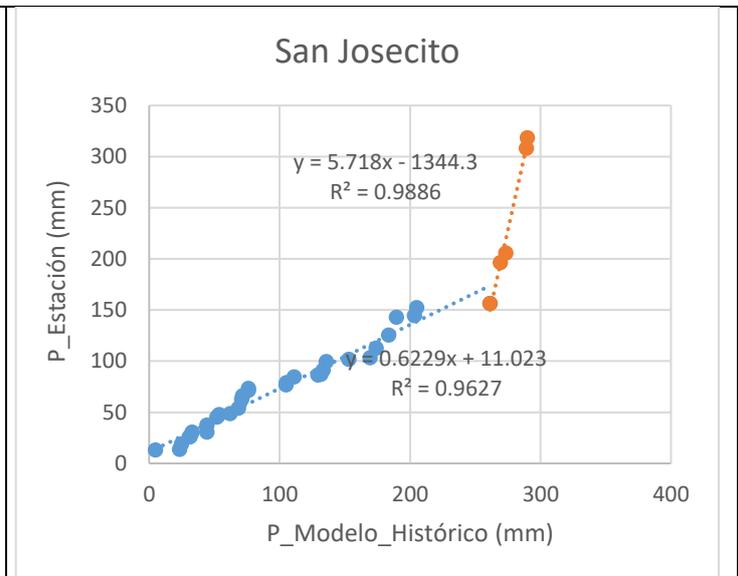
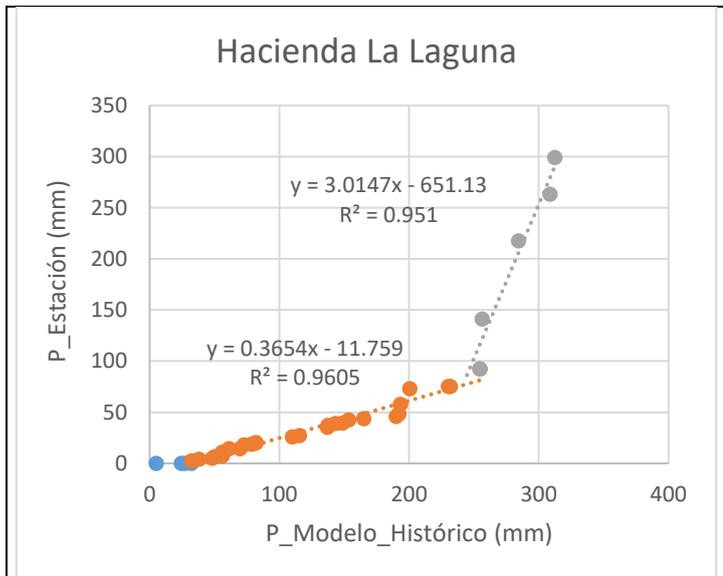


Marzo

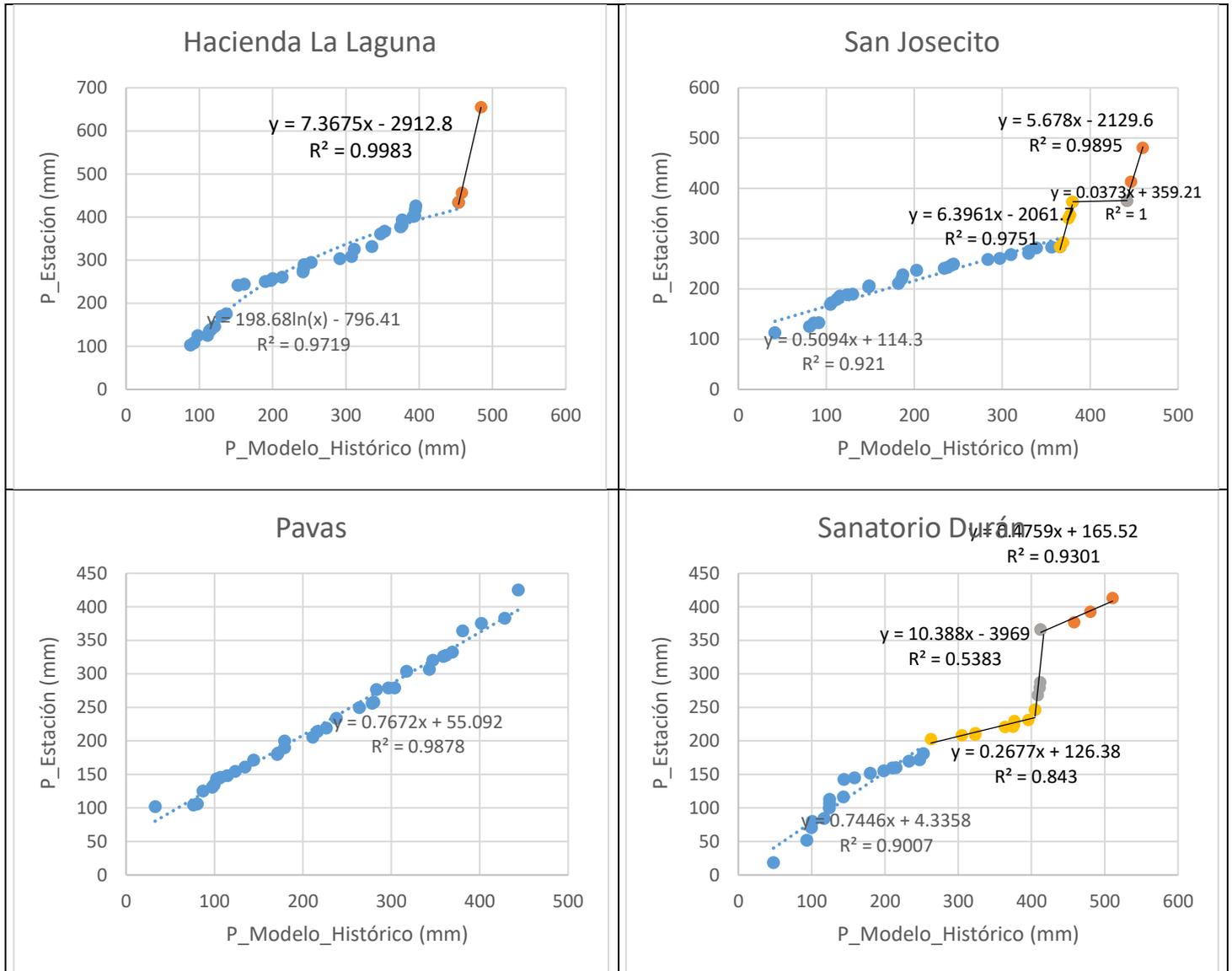




Abril

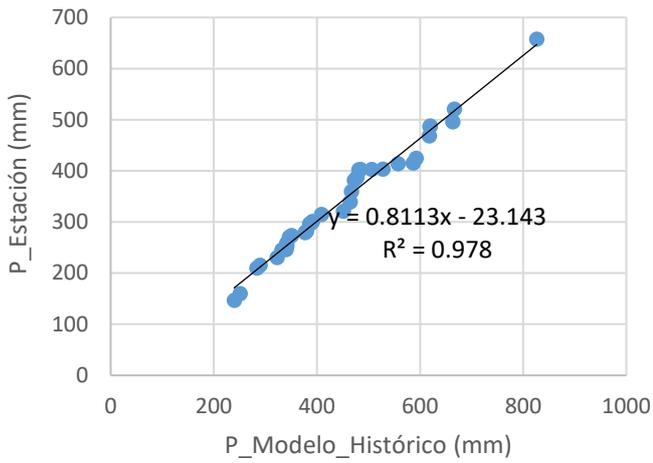


Mayo

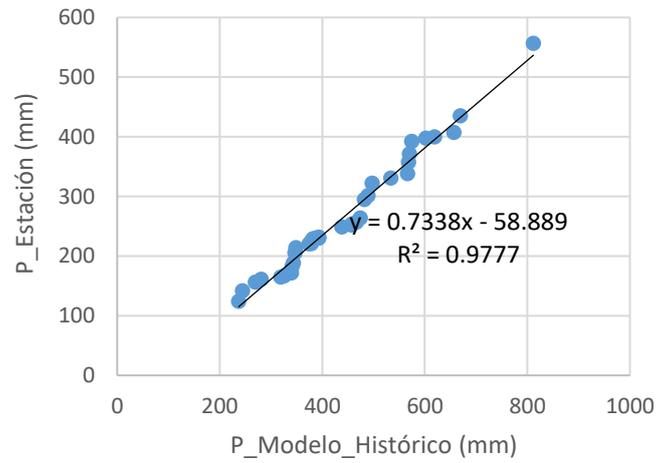


Junio

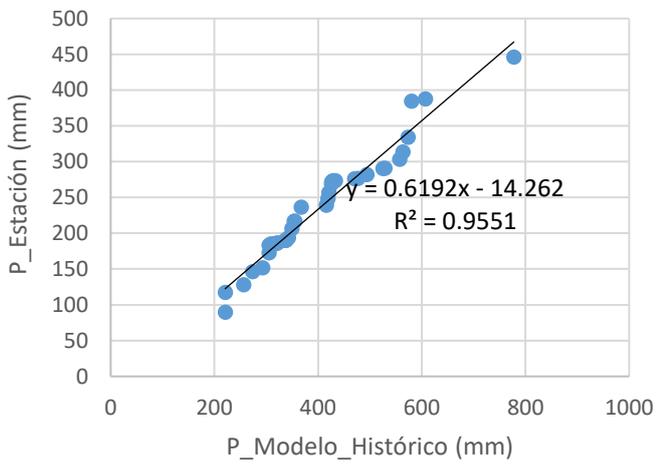
Hacienda La Laguna



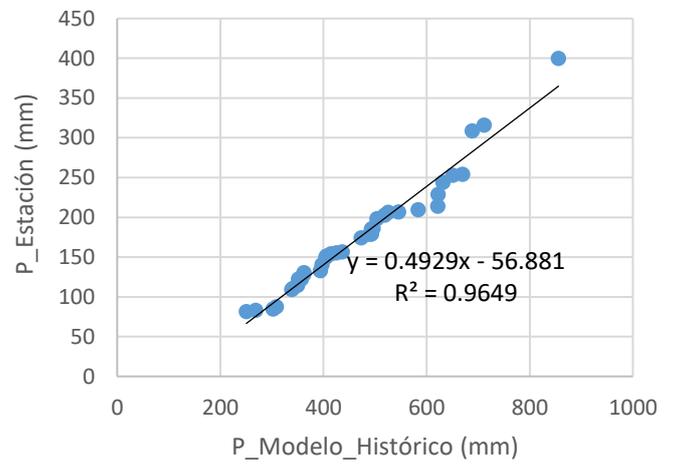
San Josecito



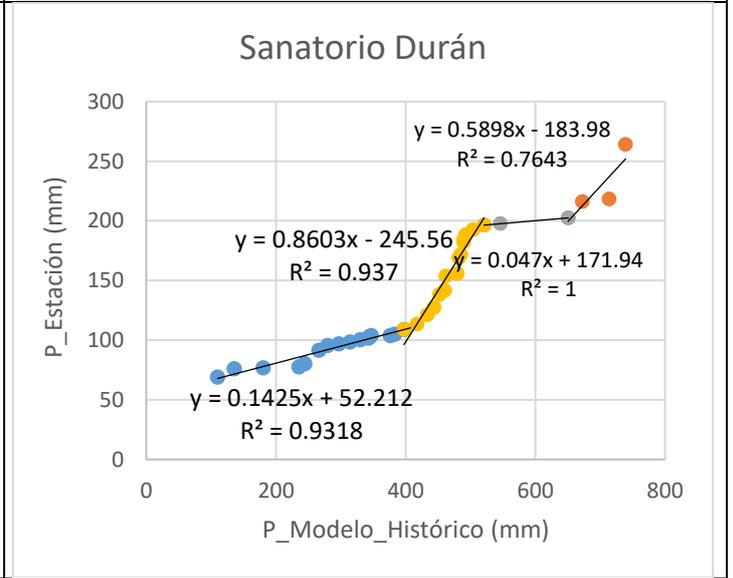
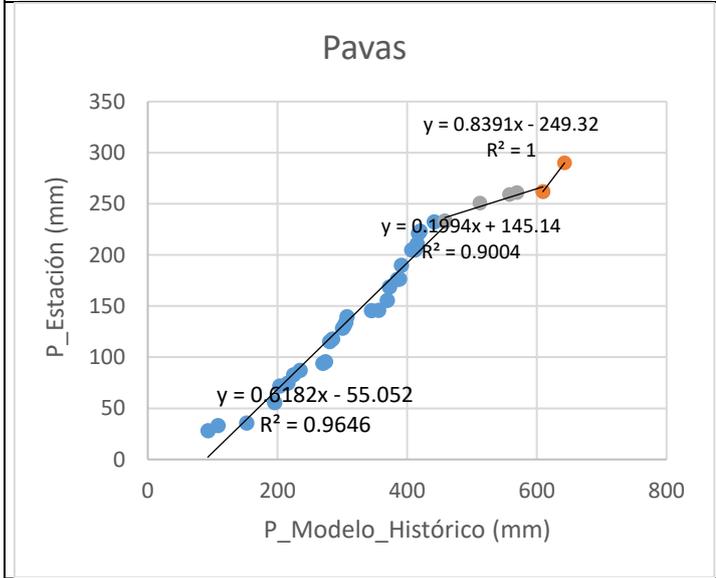
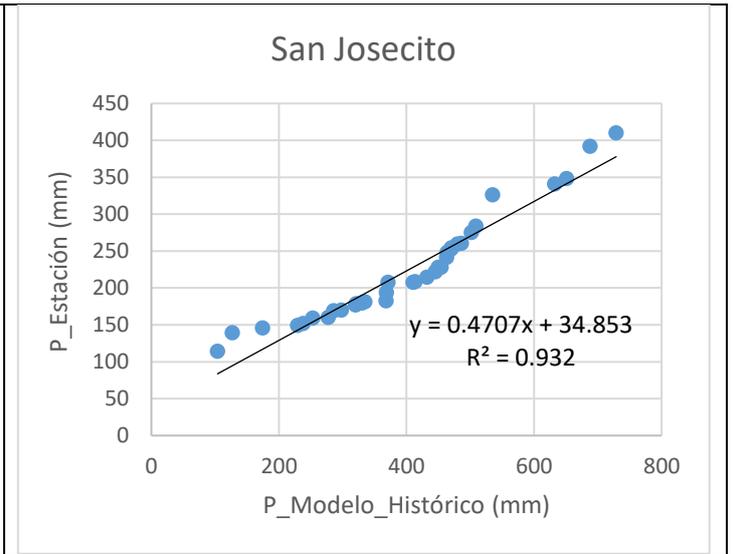
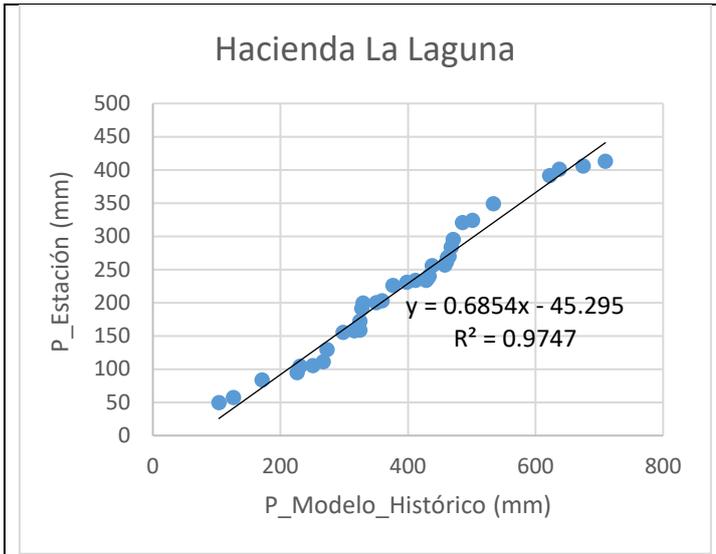
Pavas



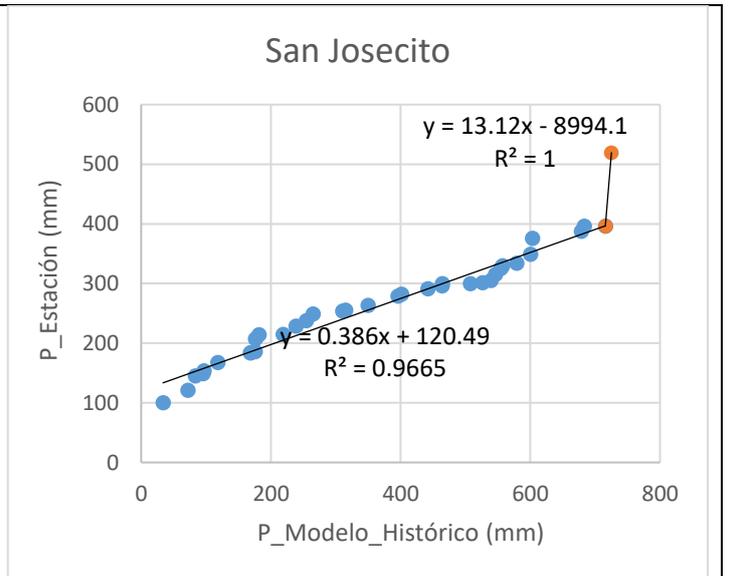
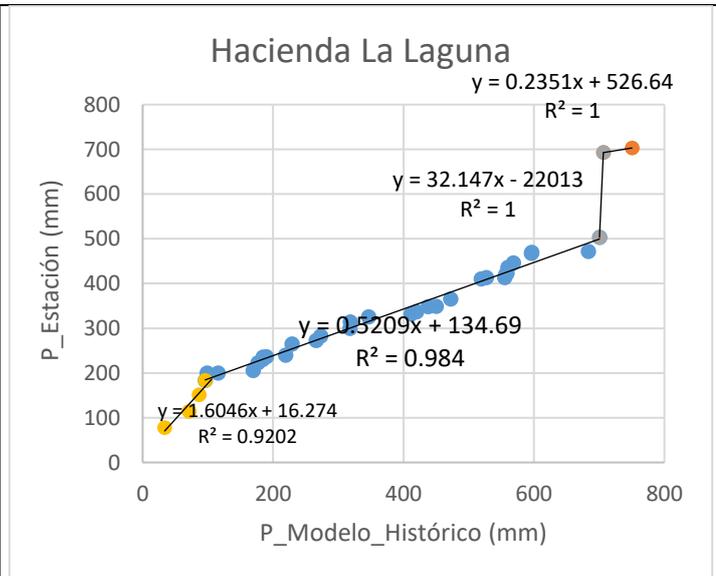
Sanatorio Durán

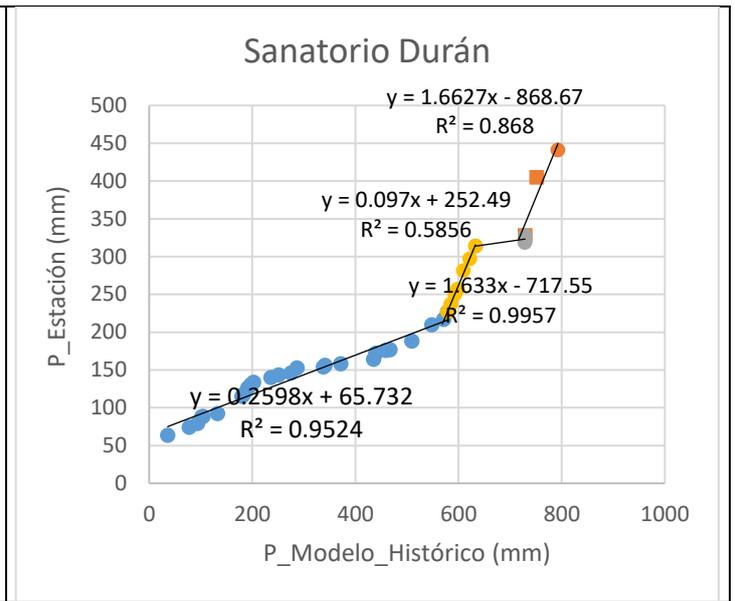
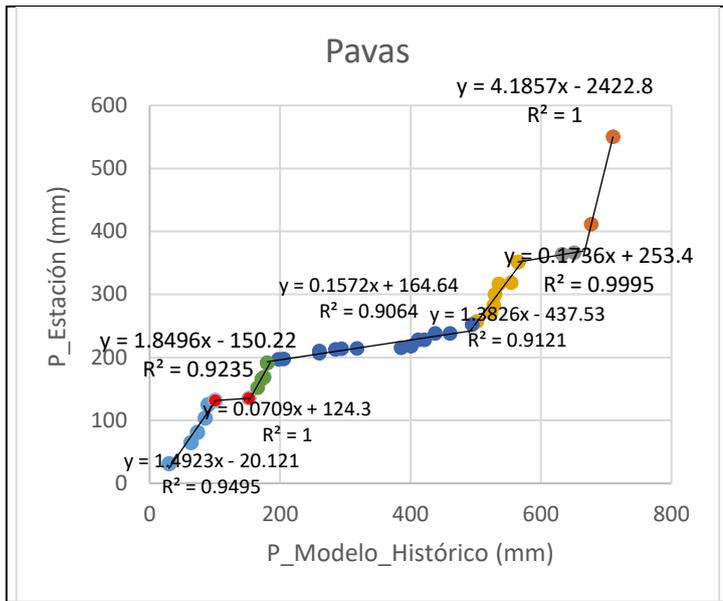


Julio

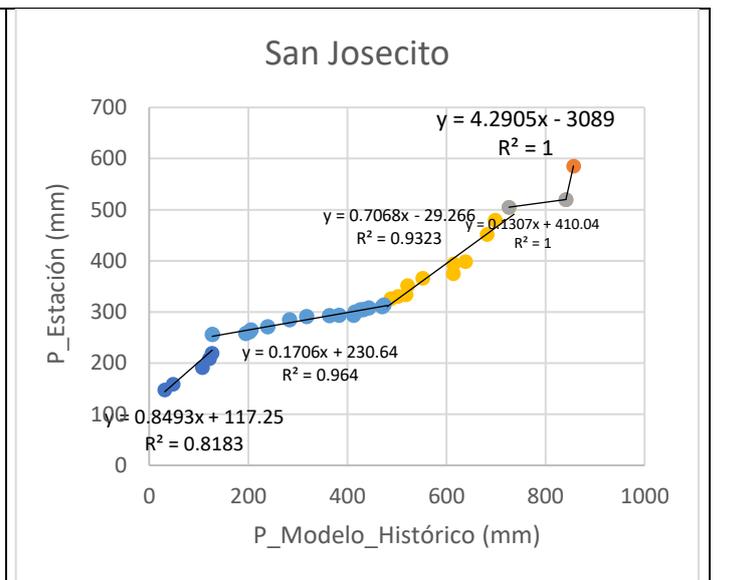
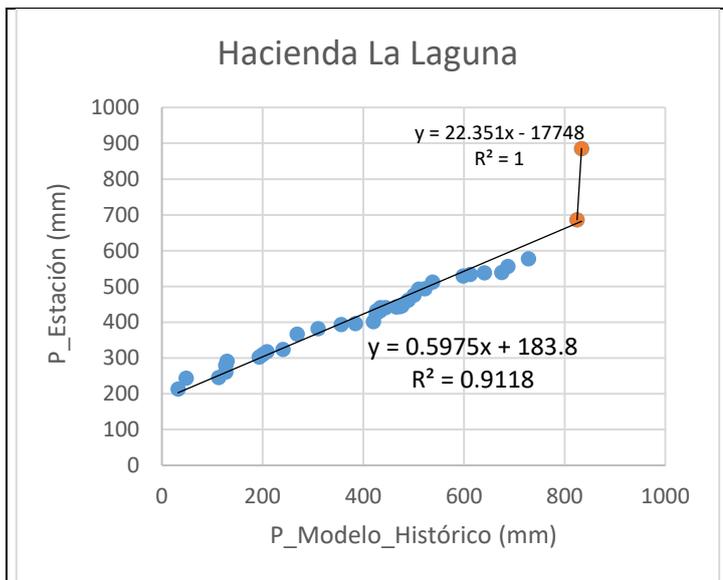


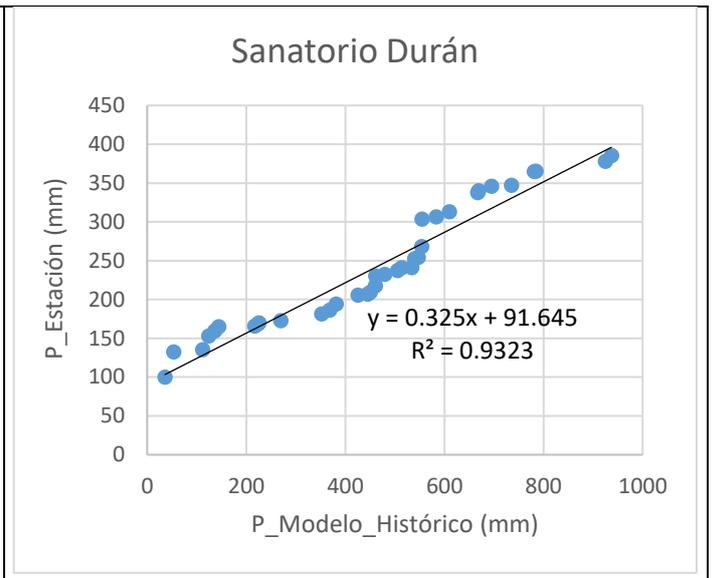
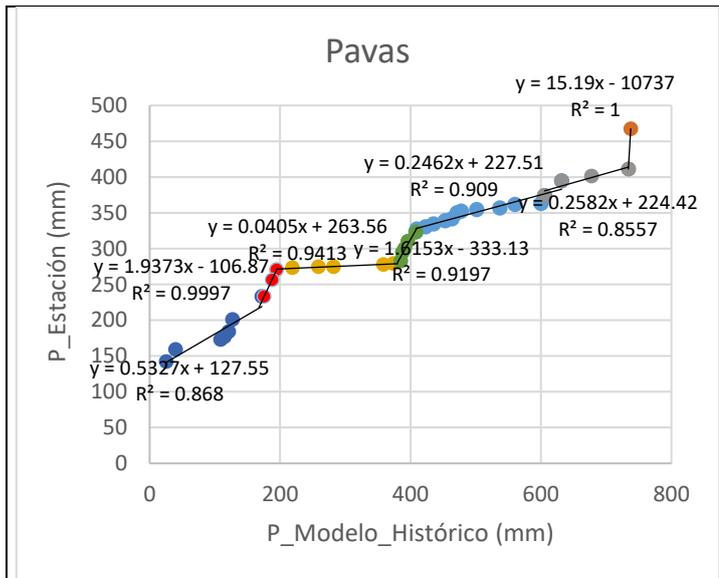
Agosto



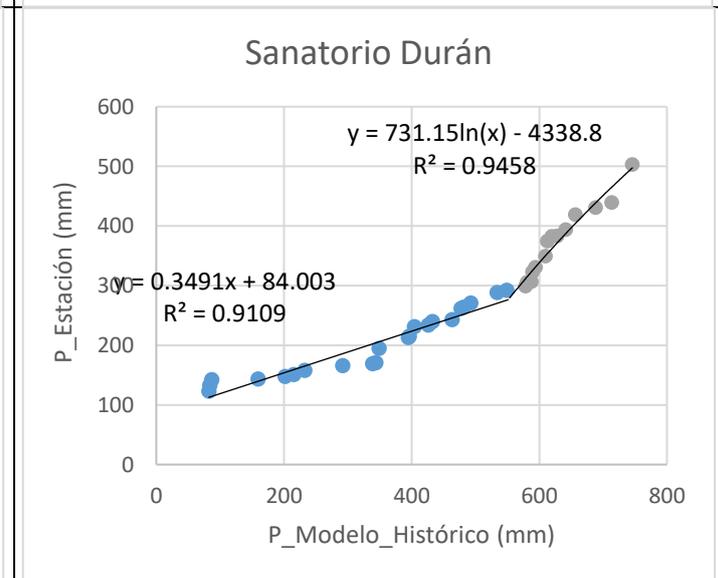
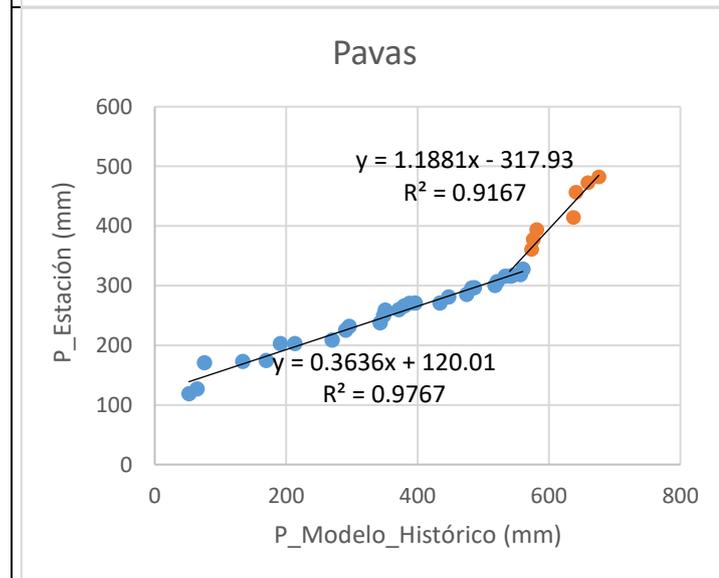
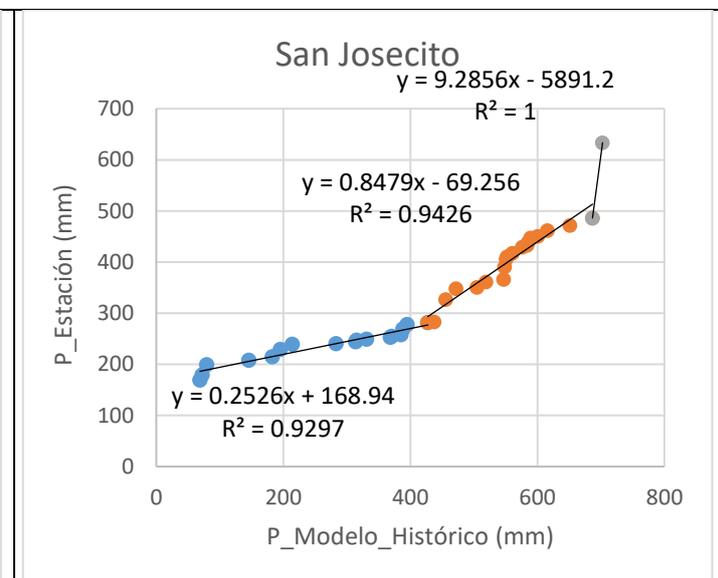
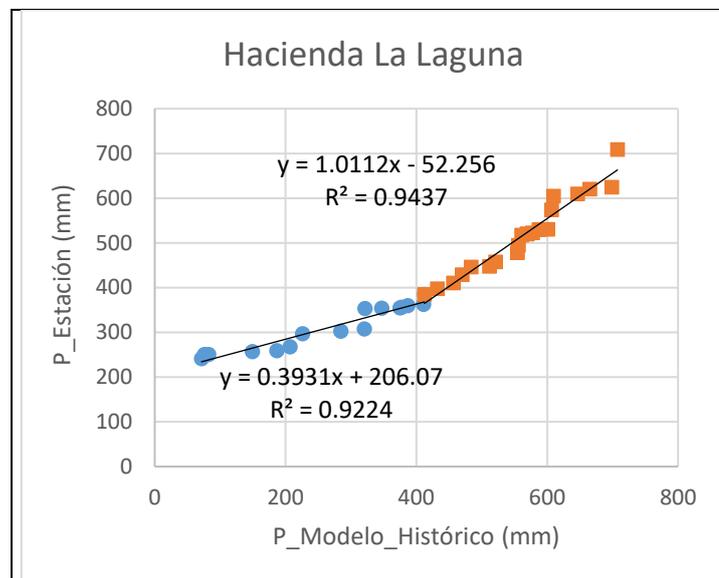


Septiembre

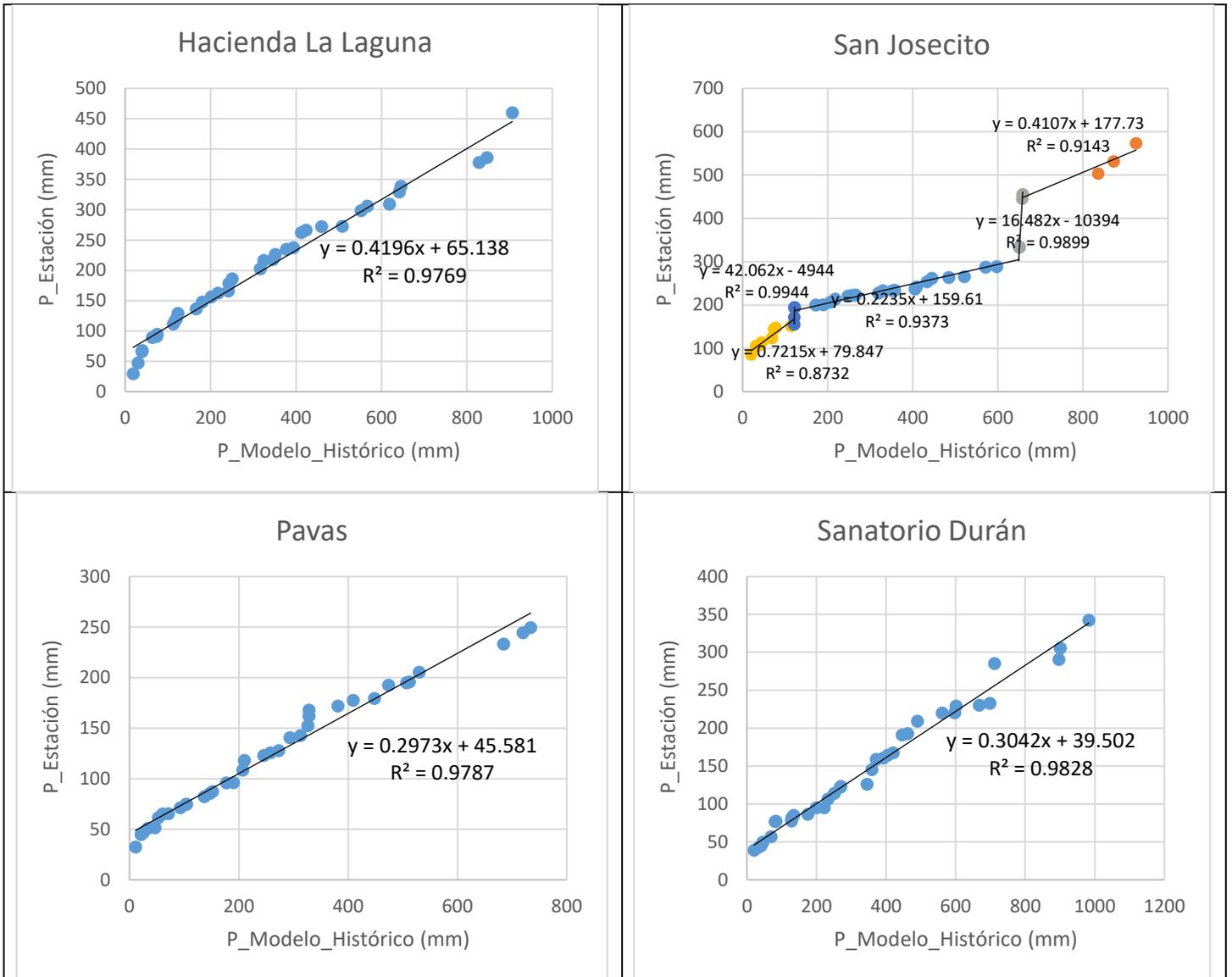




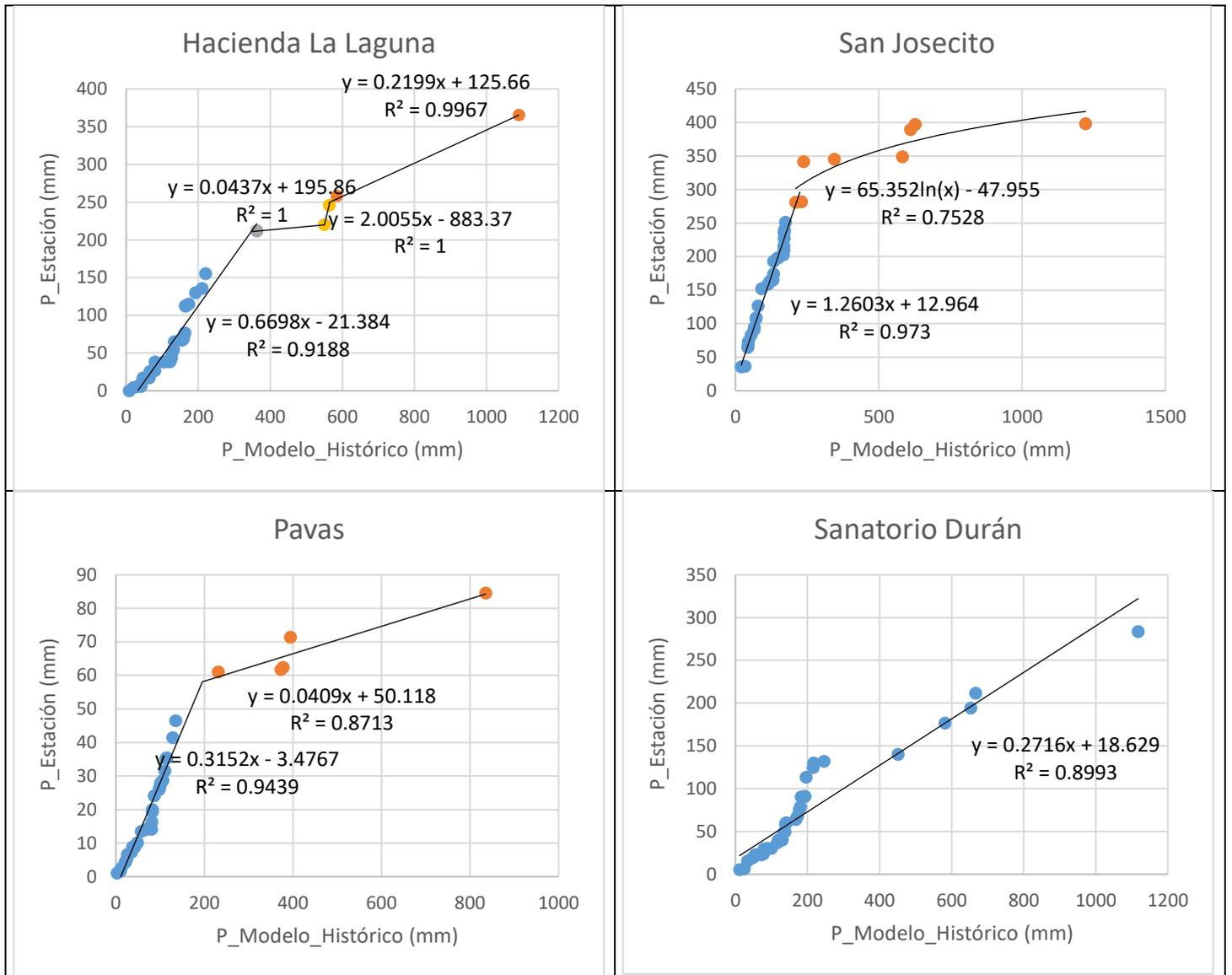
Octubre



Noviembre

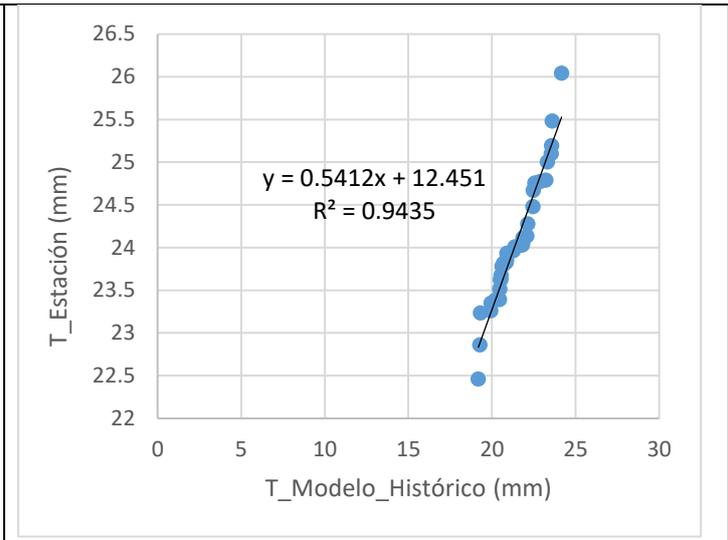
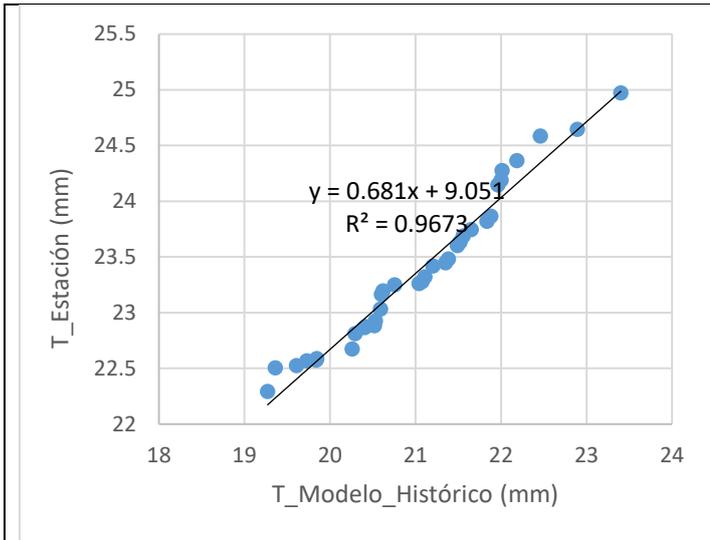


Diciembre



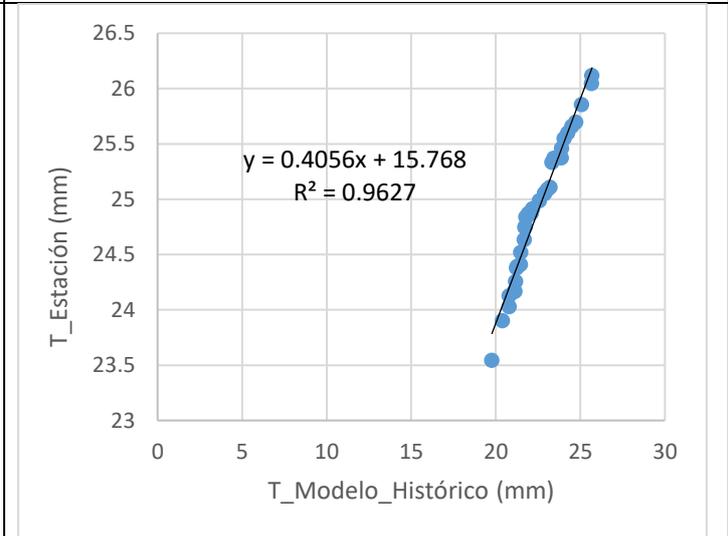
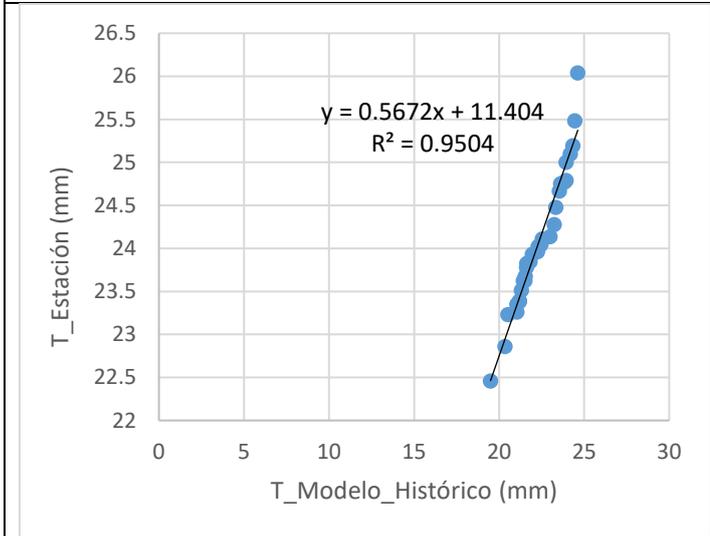
A.1.2.2. Temperatura

Enero	Febrero
-------	---------



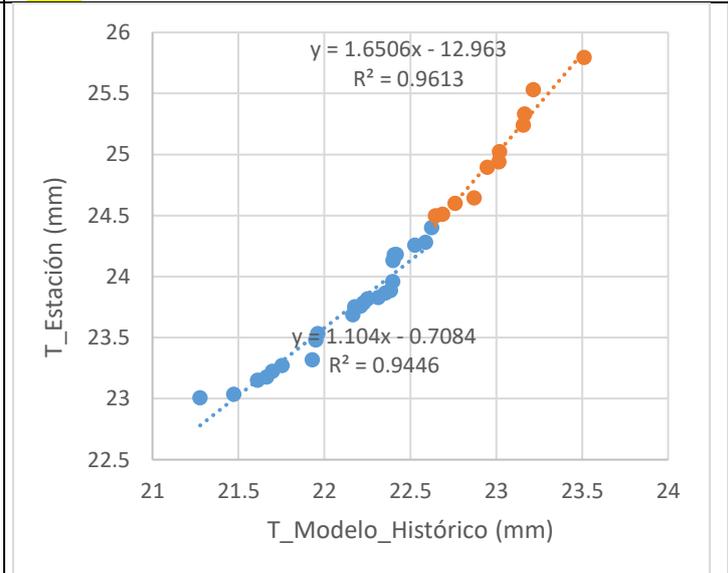
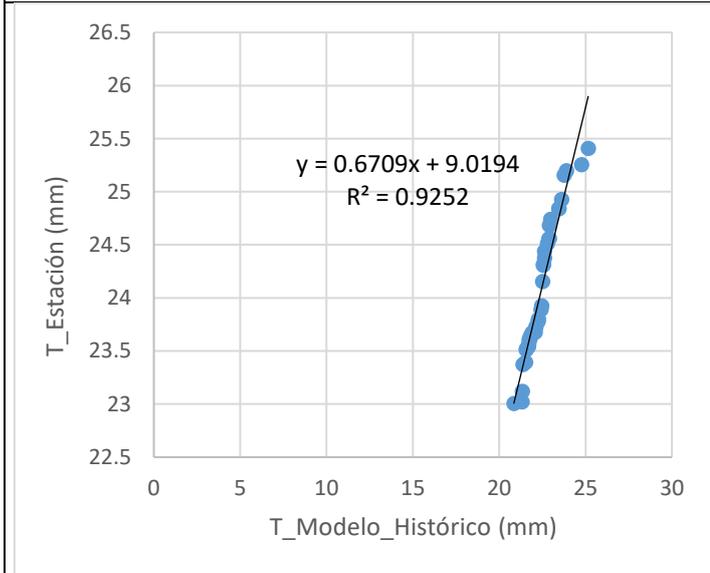
Marzo

Abril



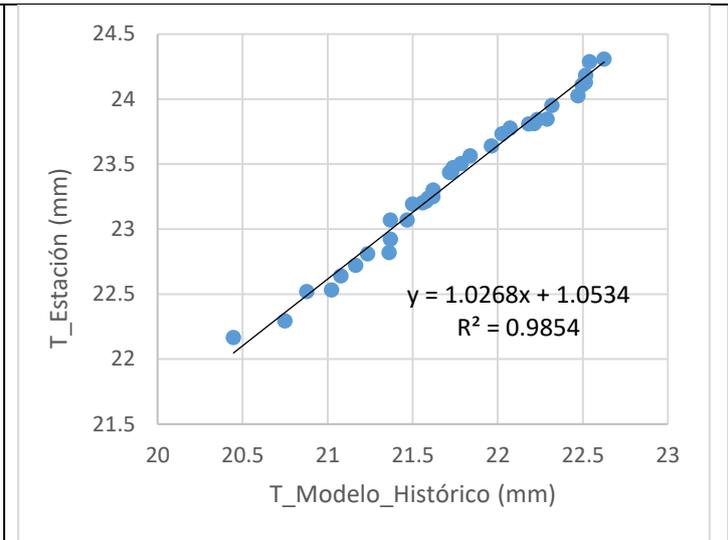
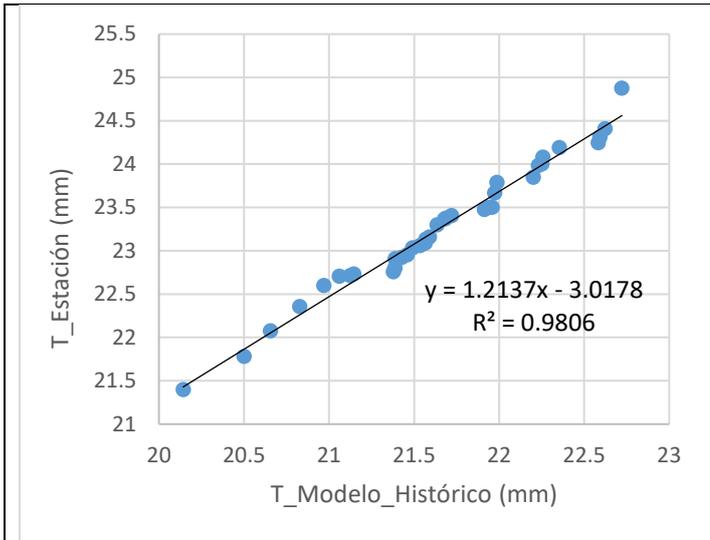
Mayo

Junio



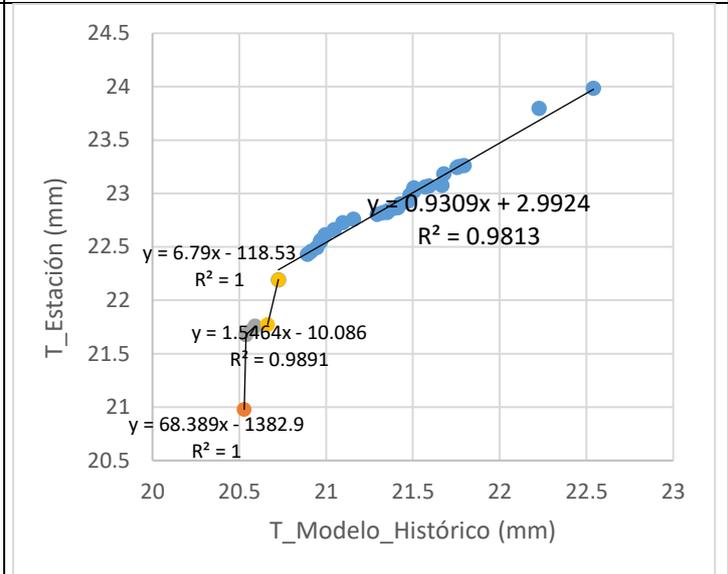
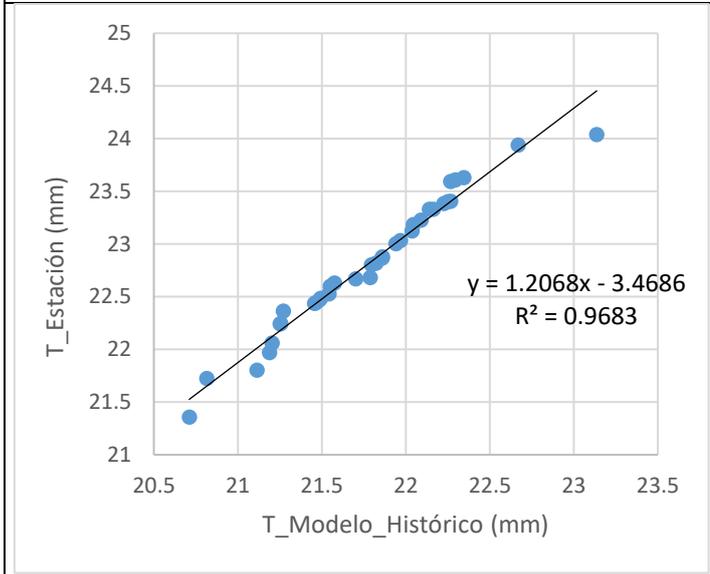
Julio

Agosto



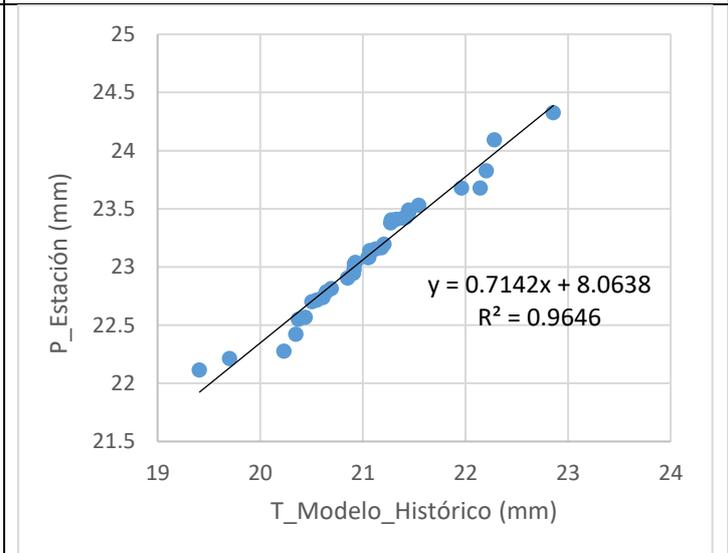
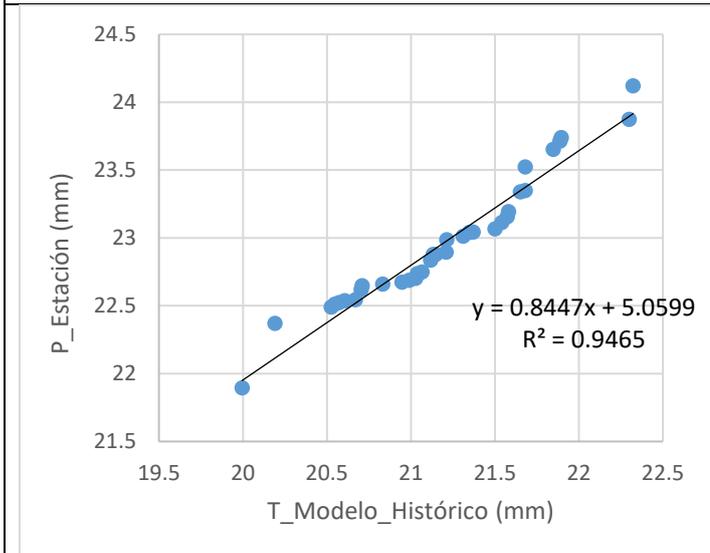
Setiembre

Octubre



Noviembre

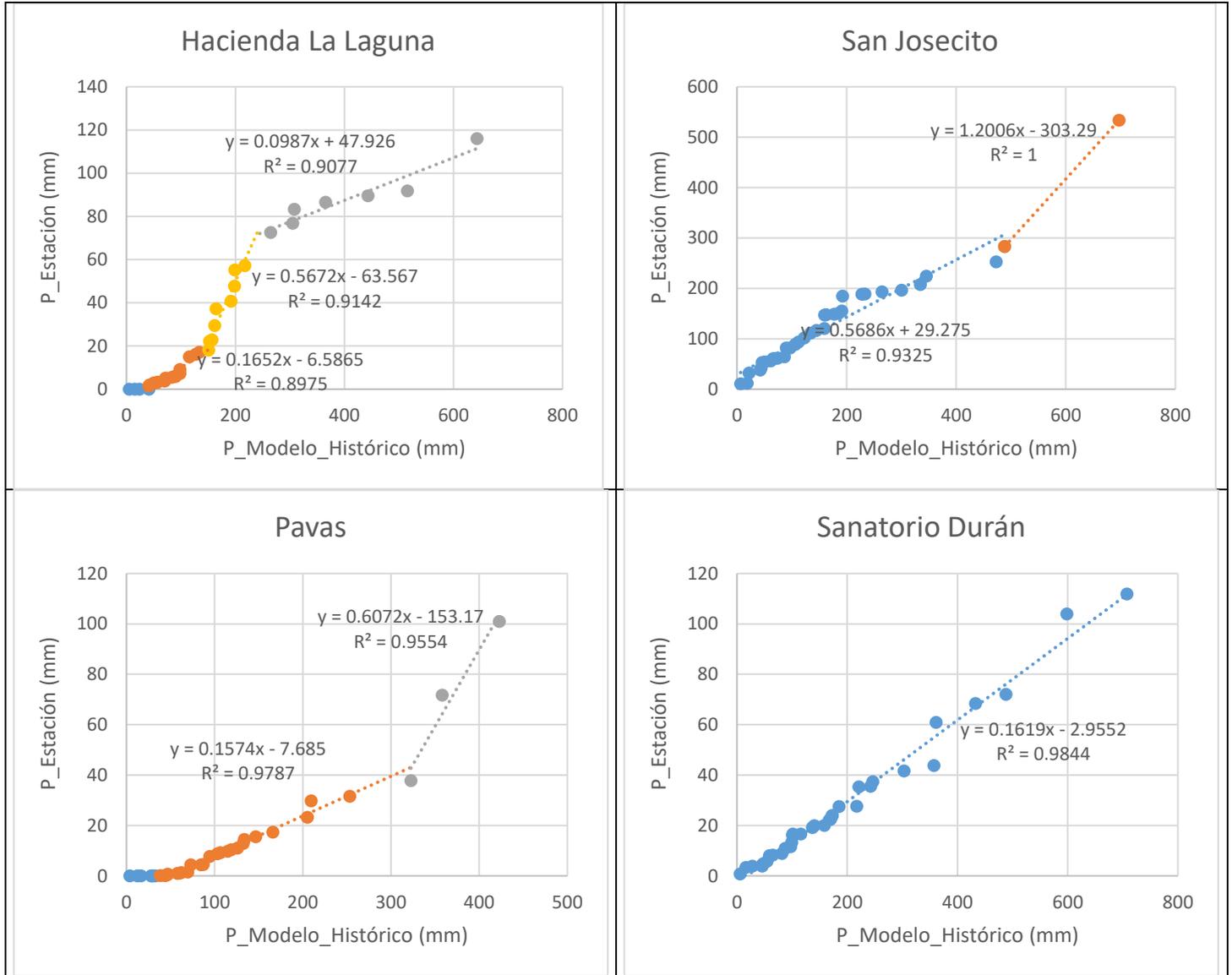
Diciembre



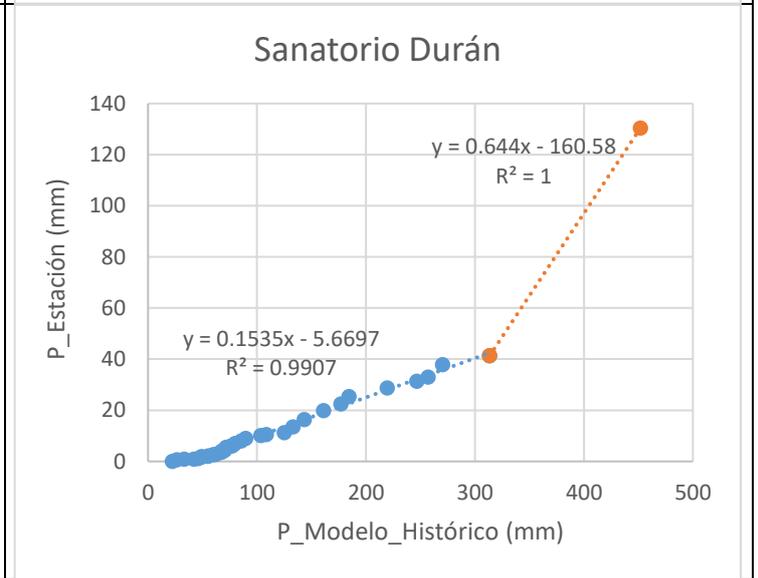
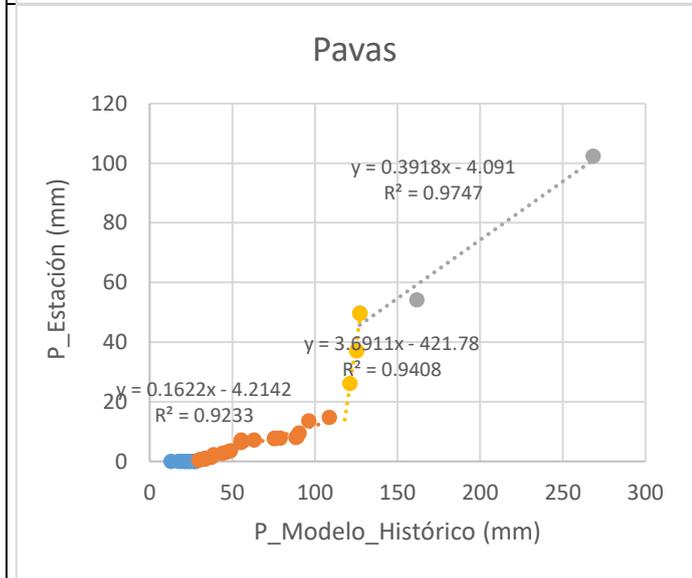
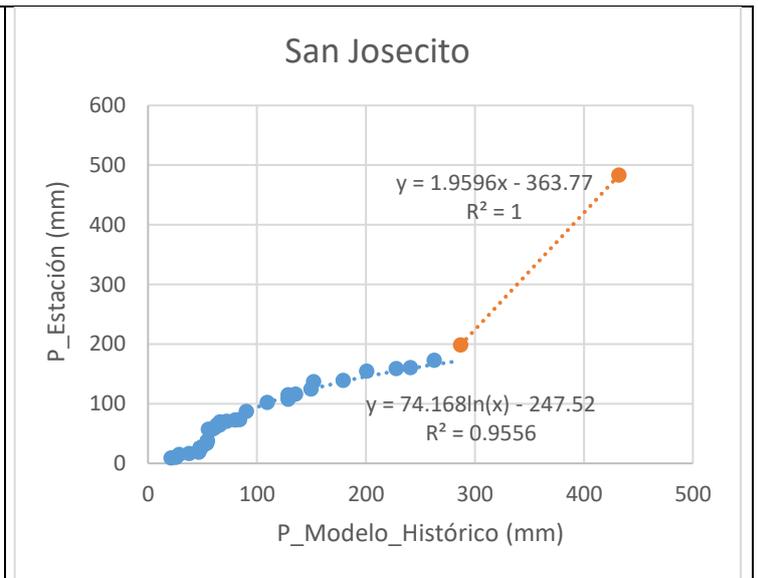
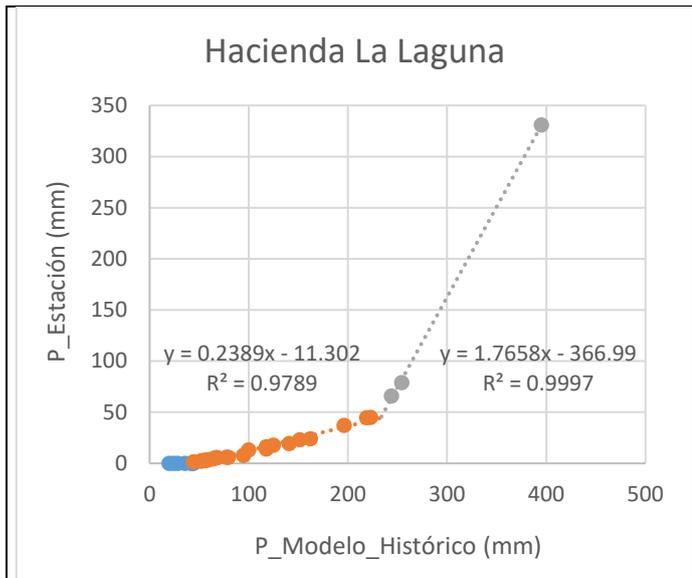
A.1.3. Modelo MPI

A.1.3.1. Precipitación

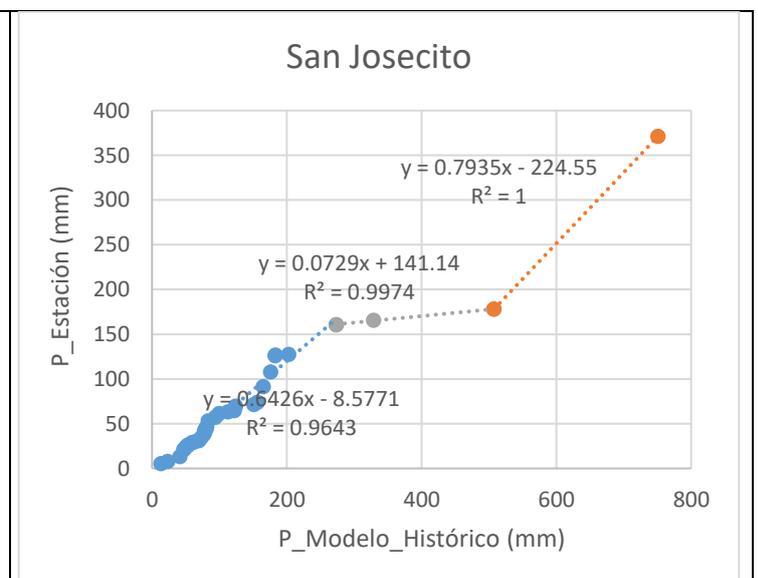
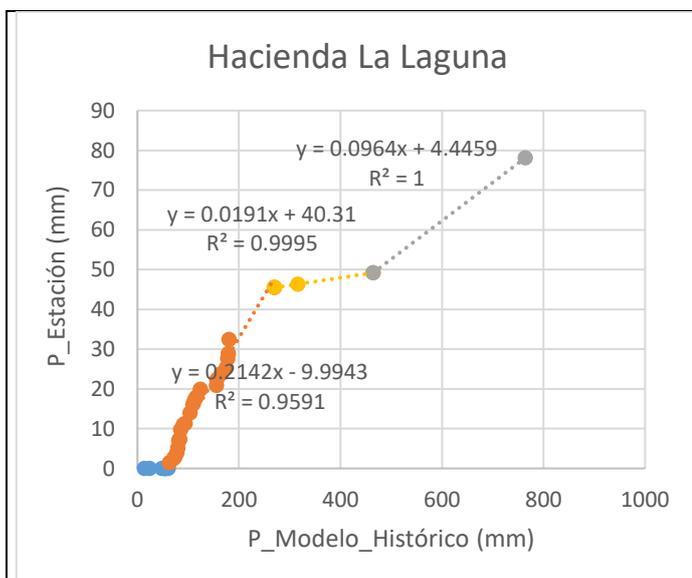
Enero

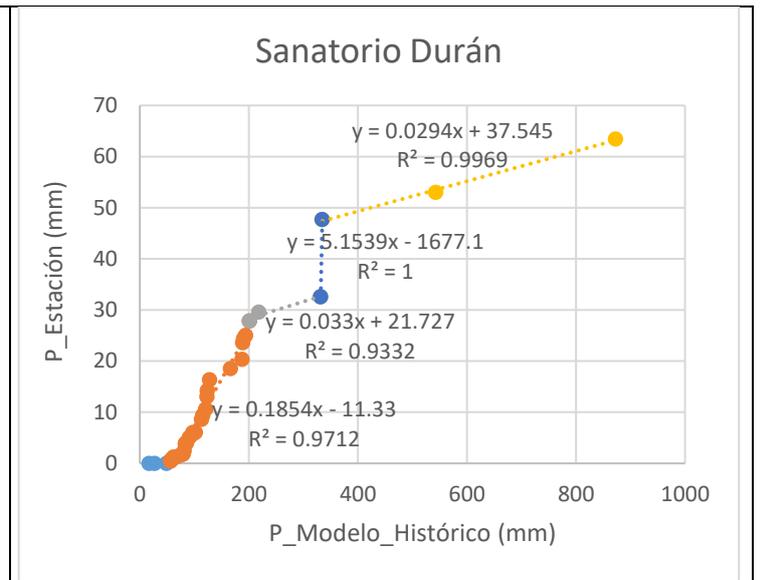
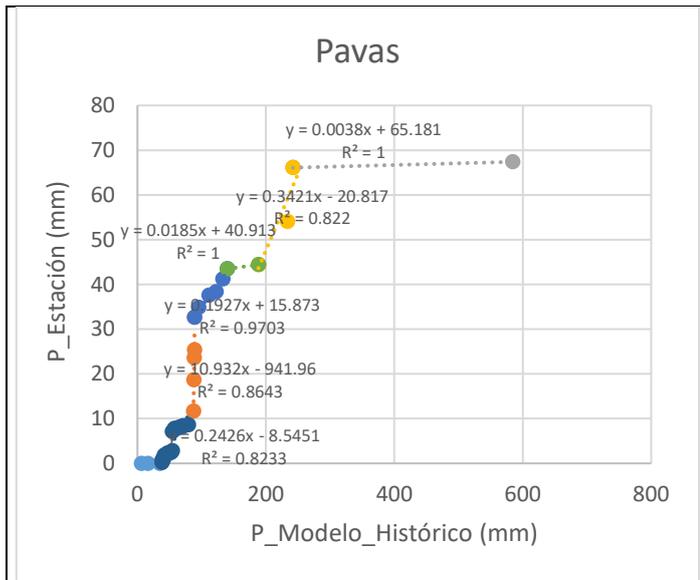


Febrero

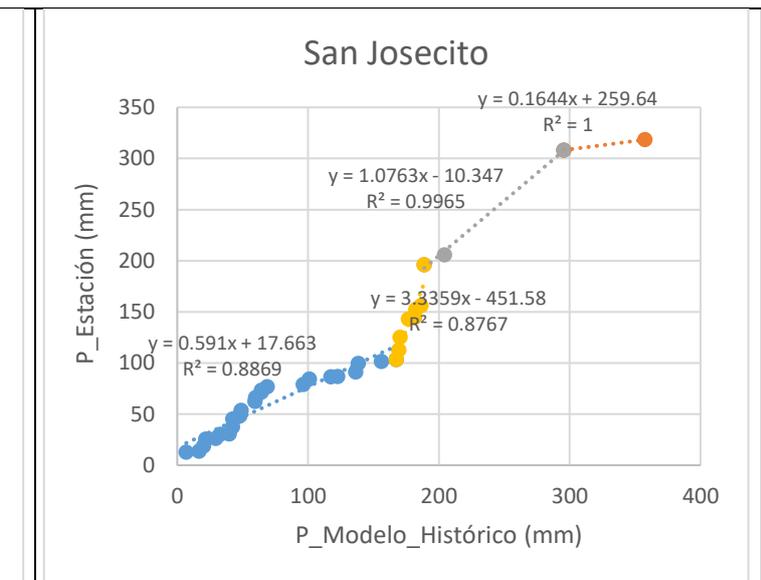
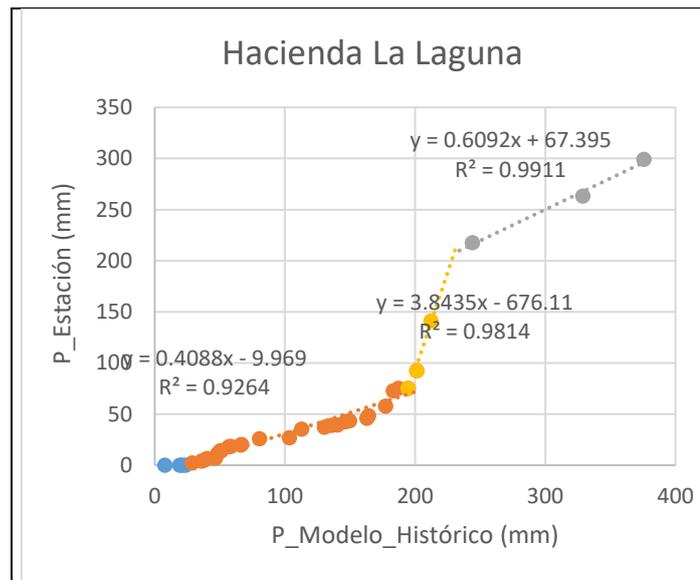


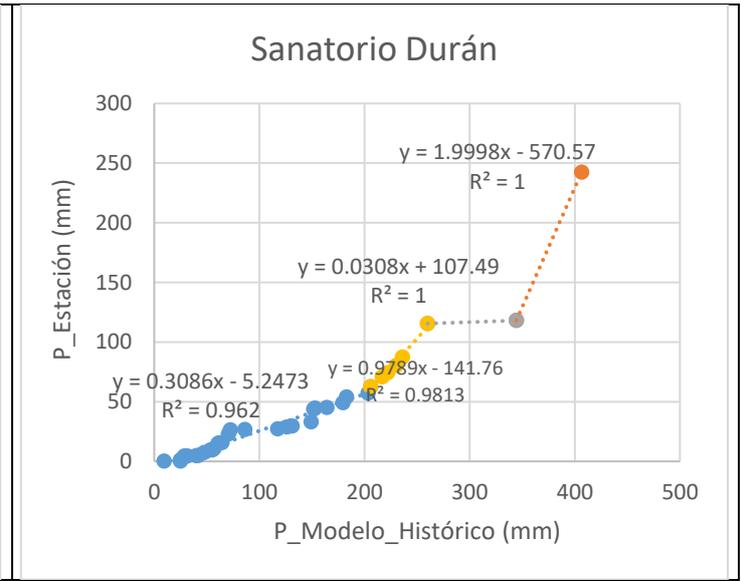
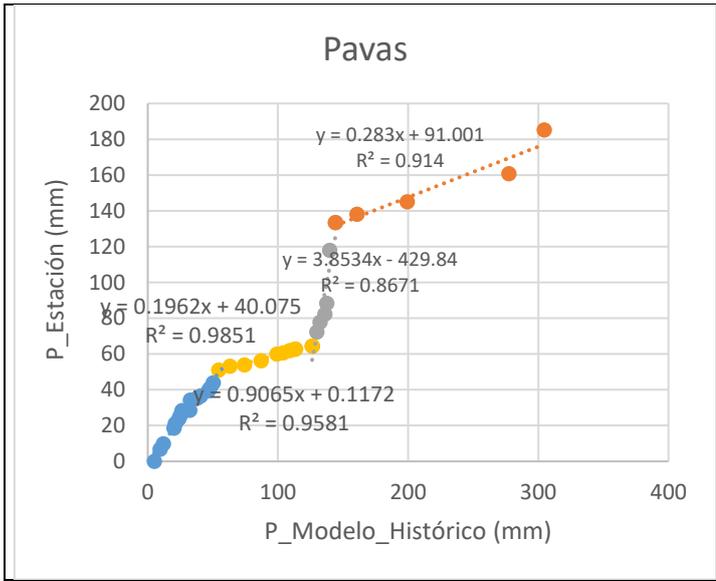
Marzo



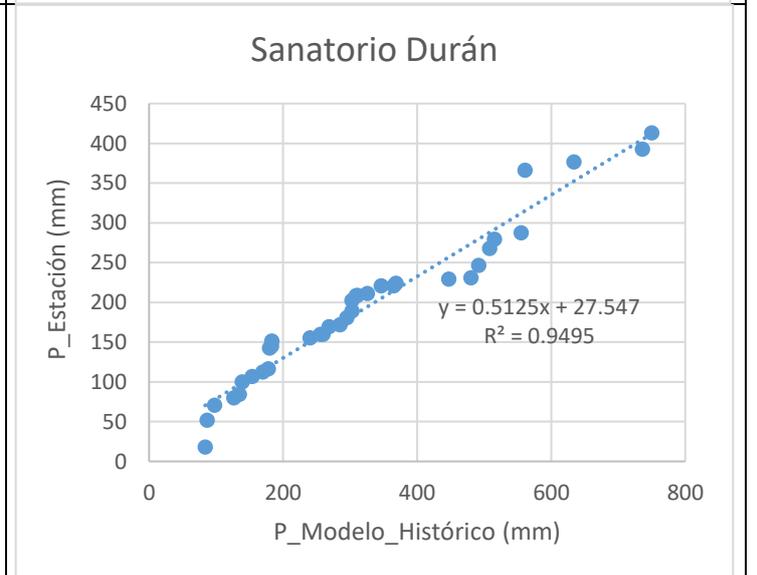
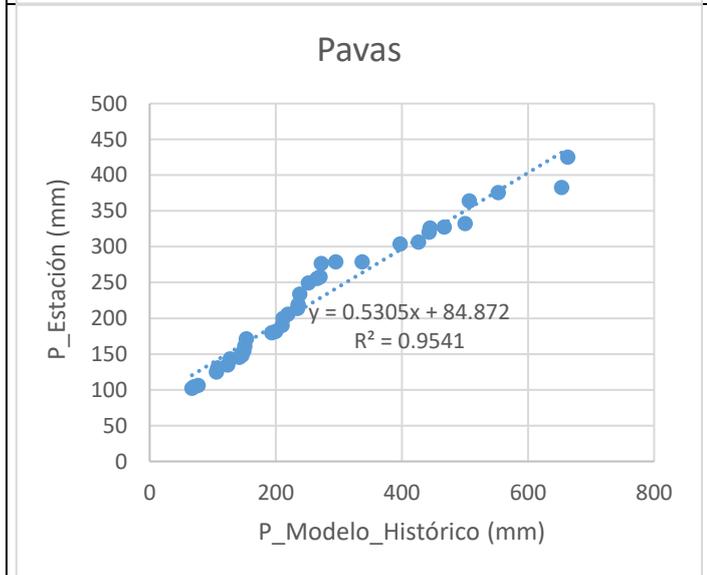
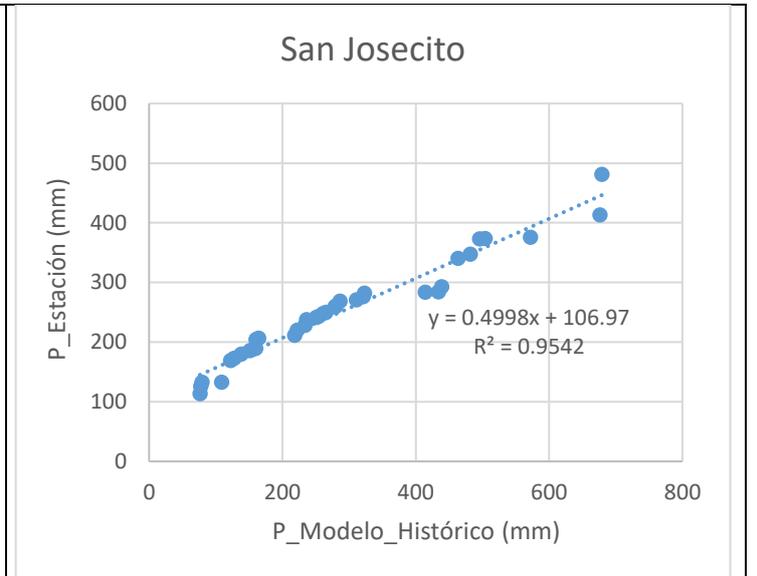
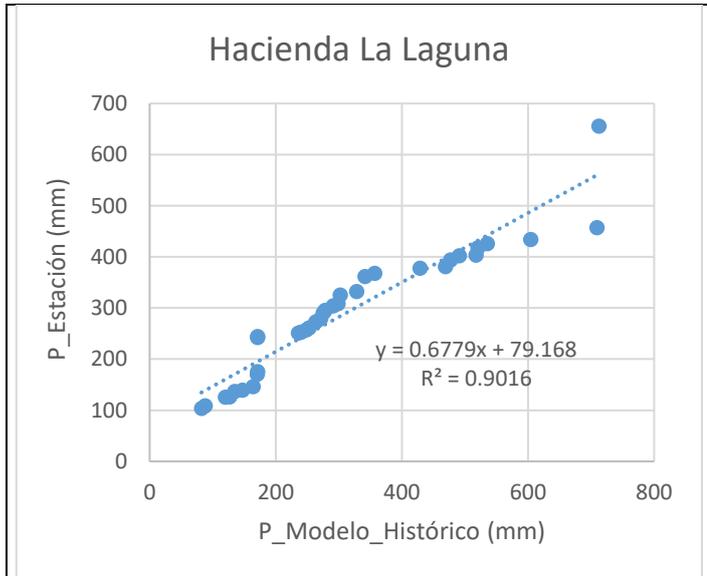


Abril

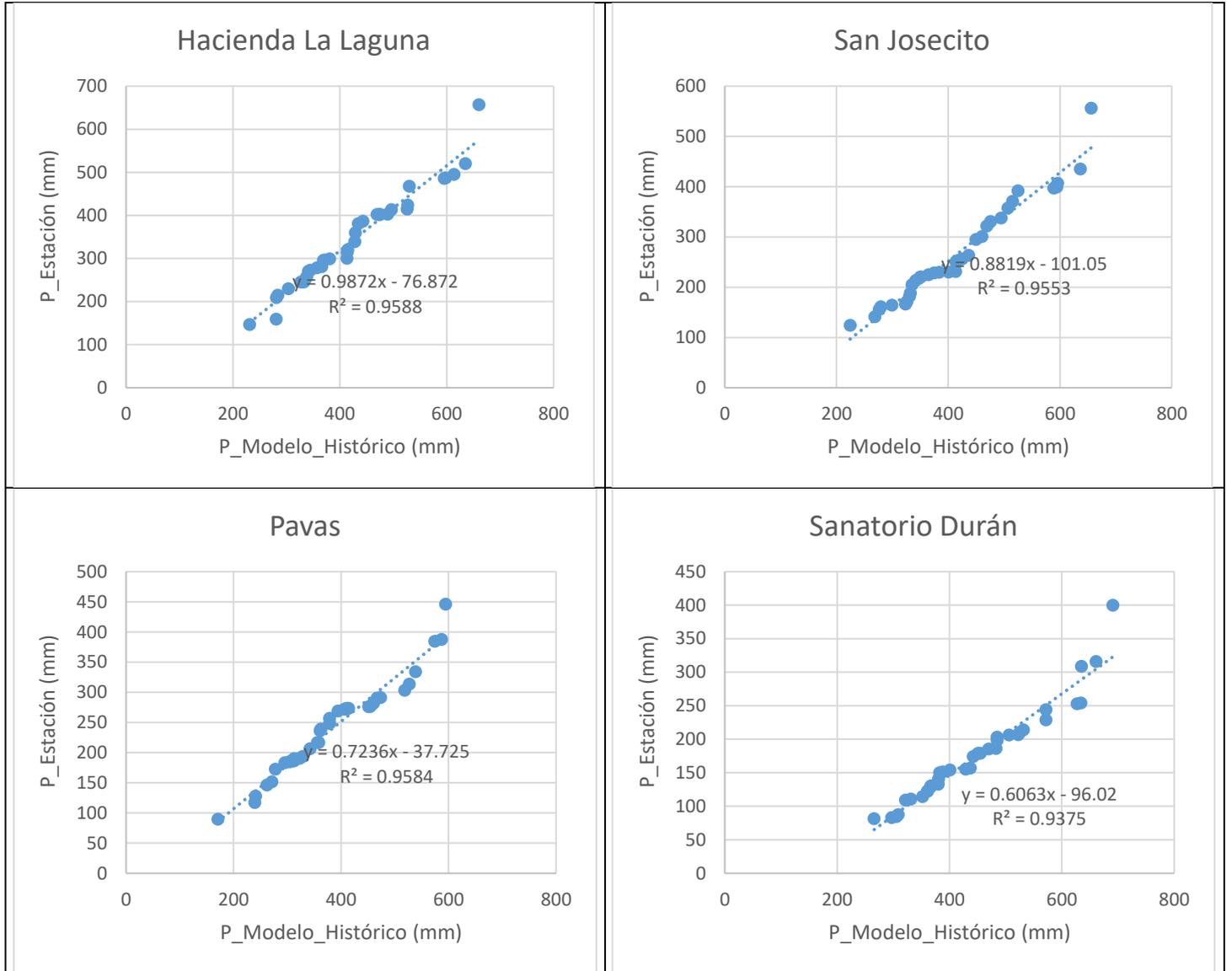




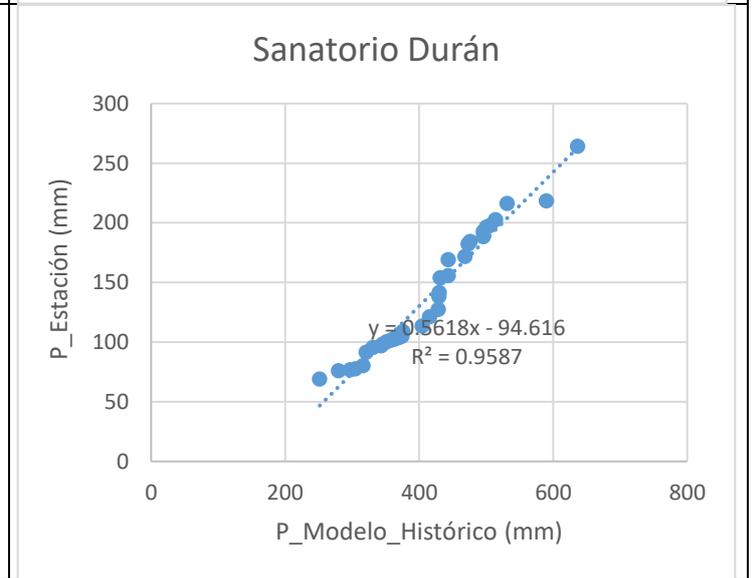
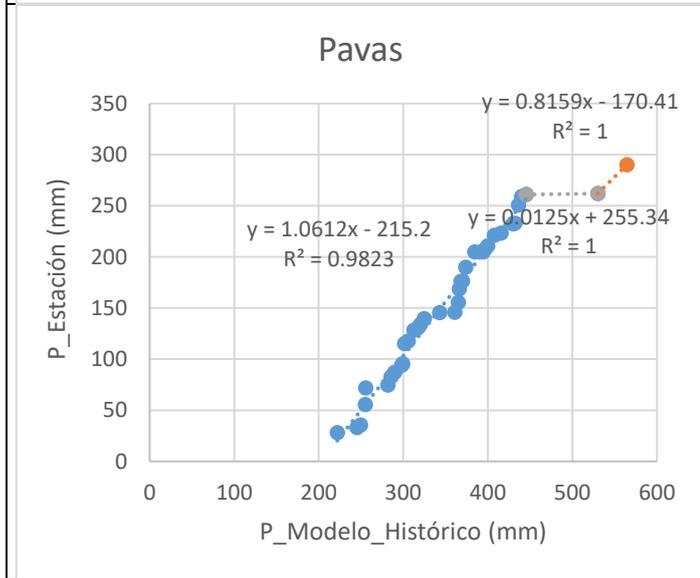
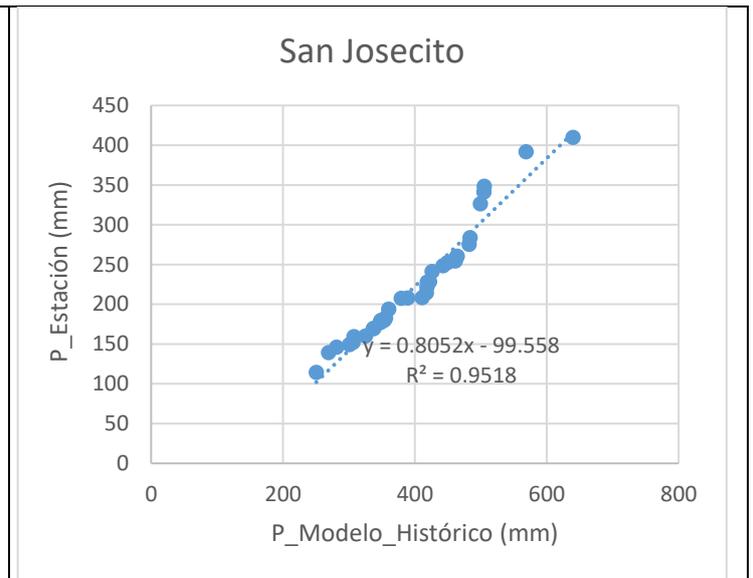
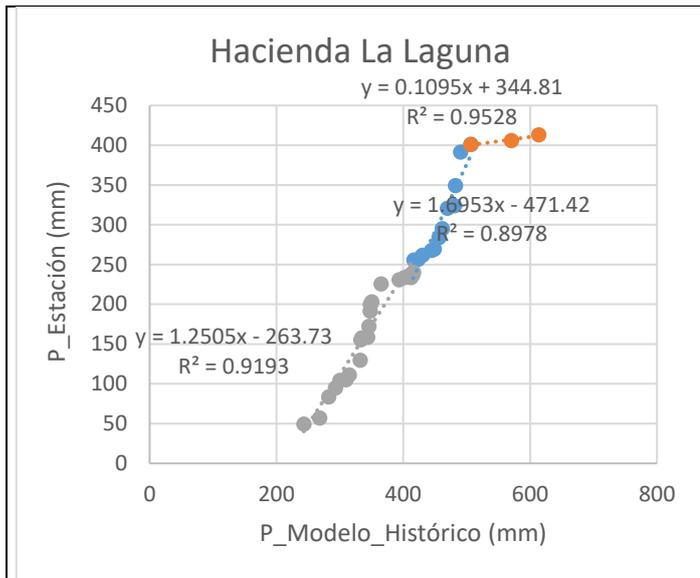
Mayo



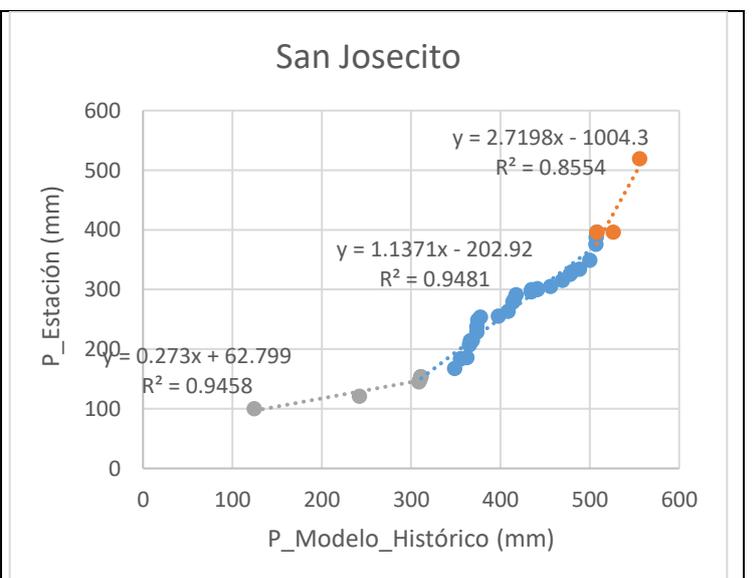
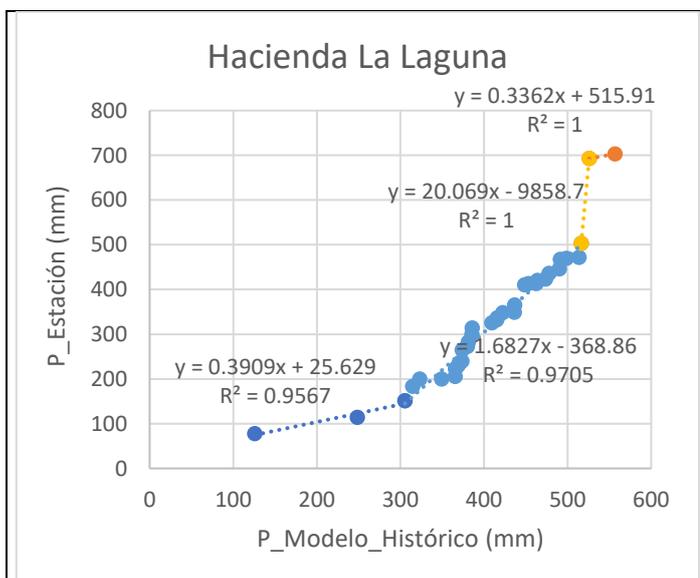
Junio

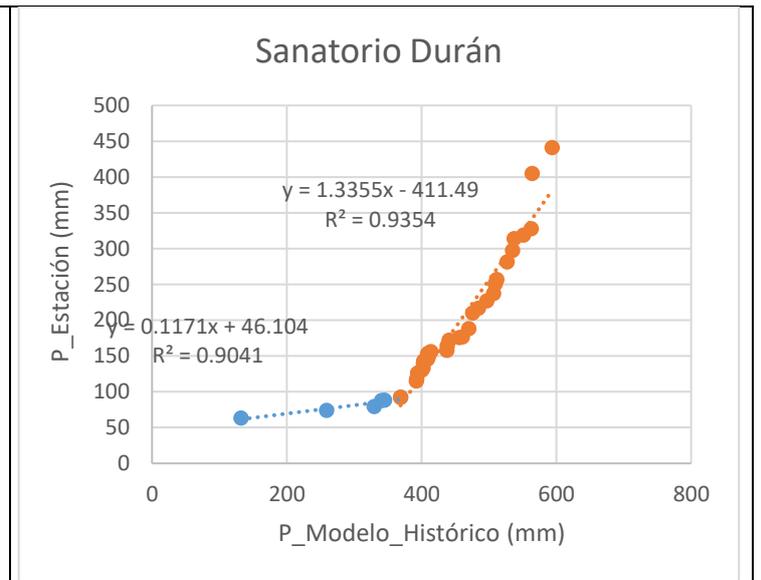
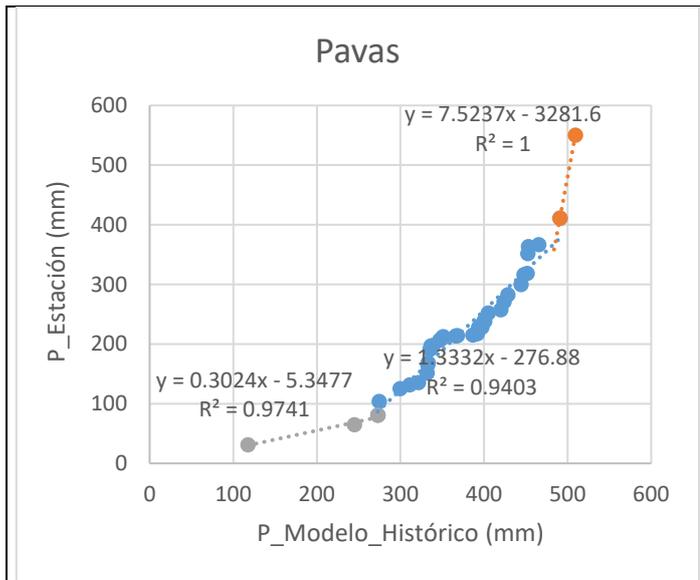


Julio

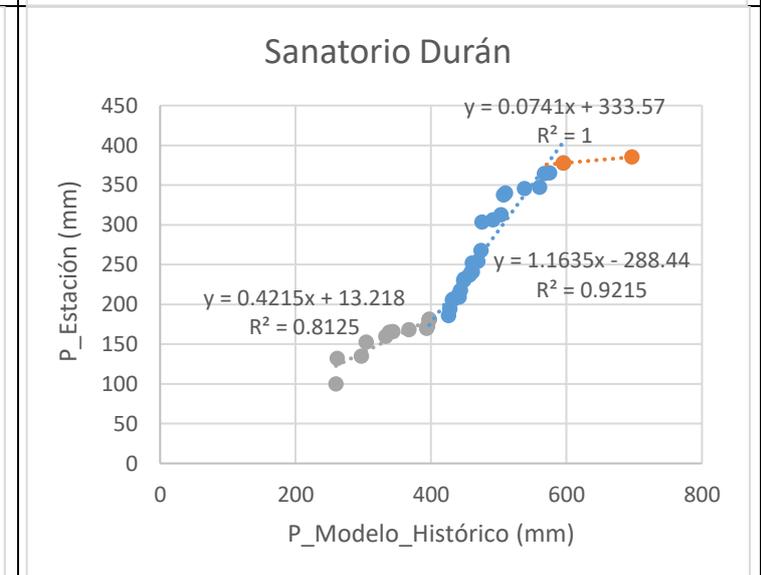
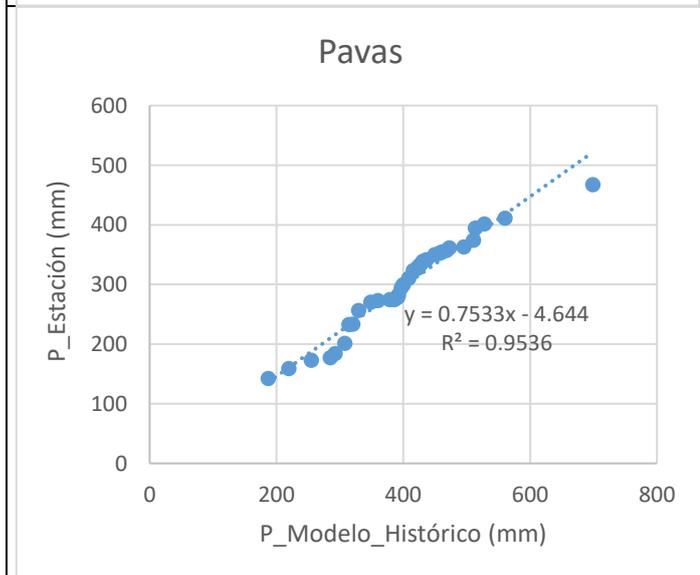
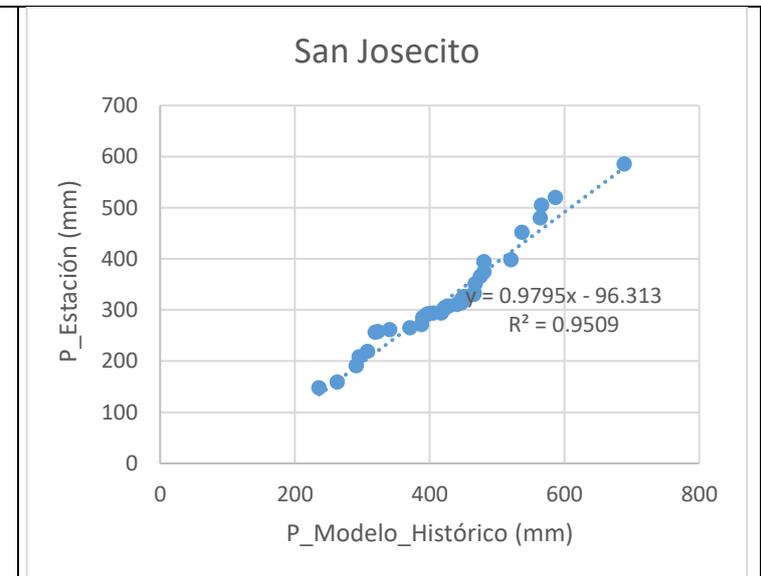
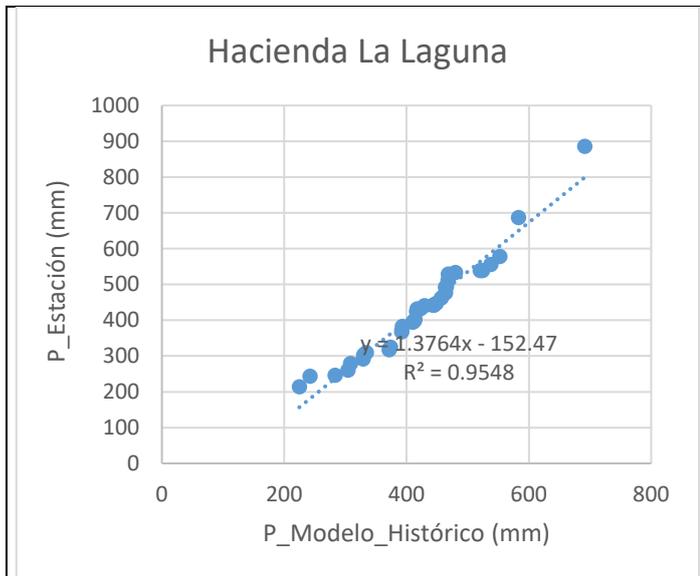


Agosto

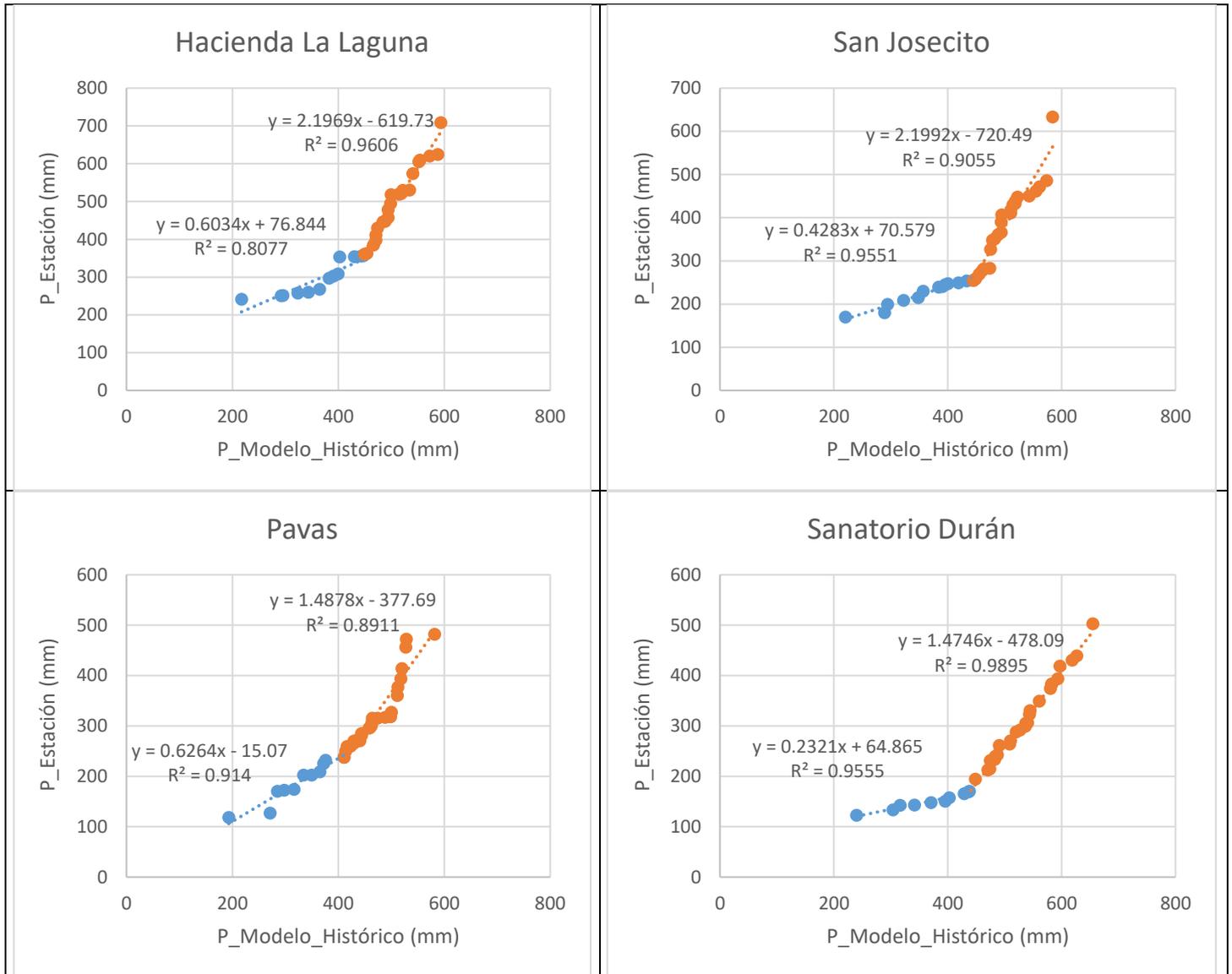




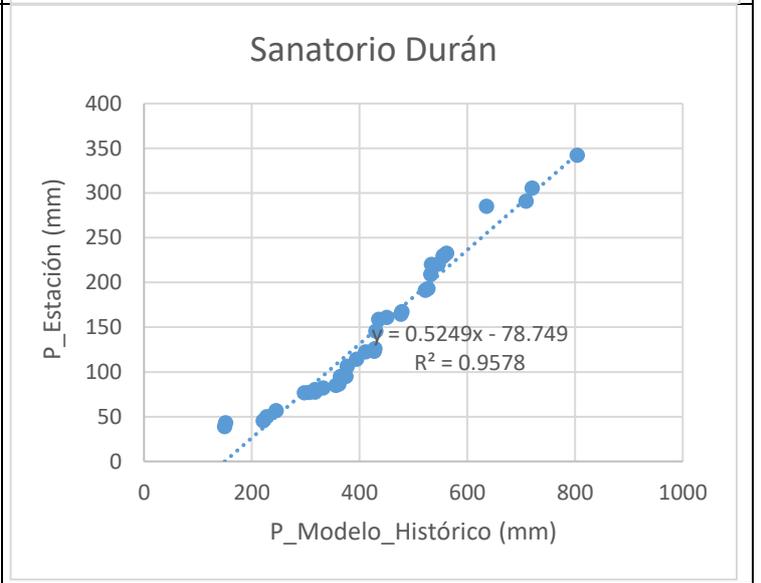
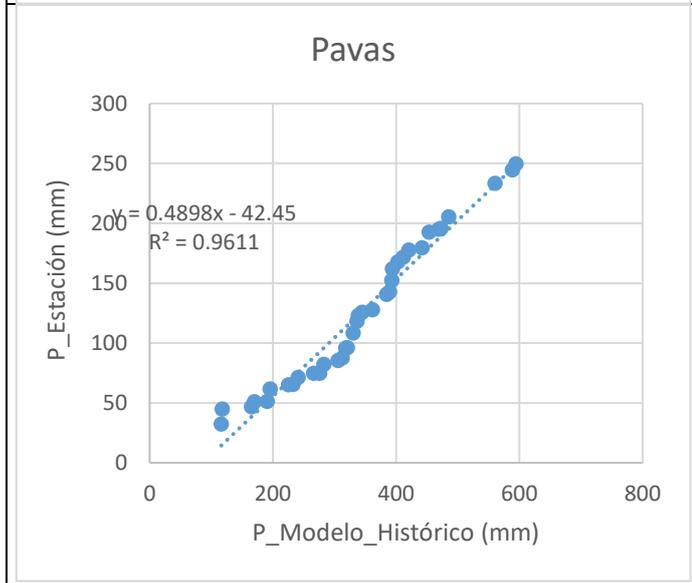
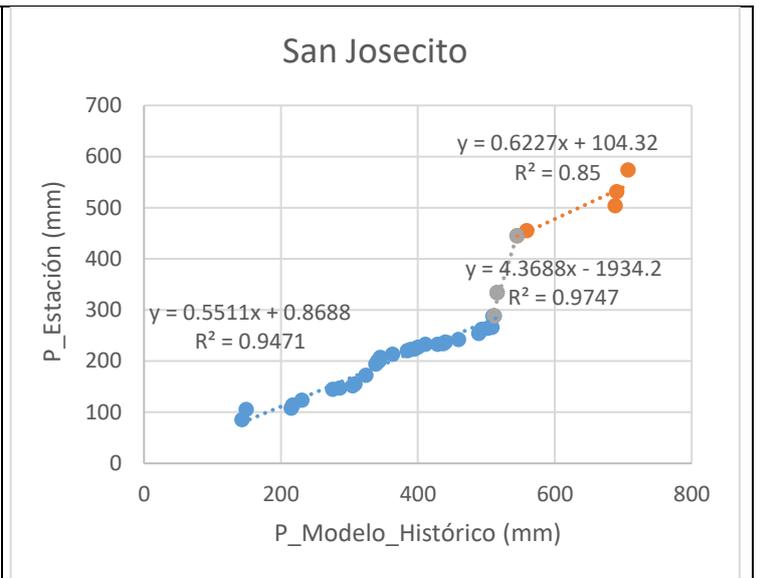
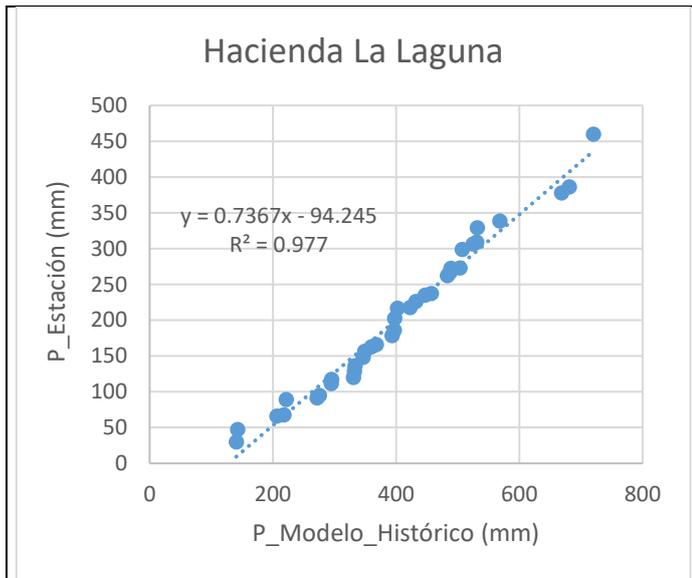
Septiembre



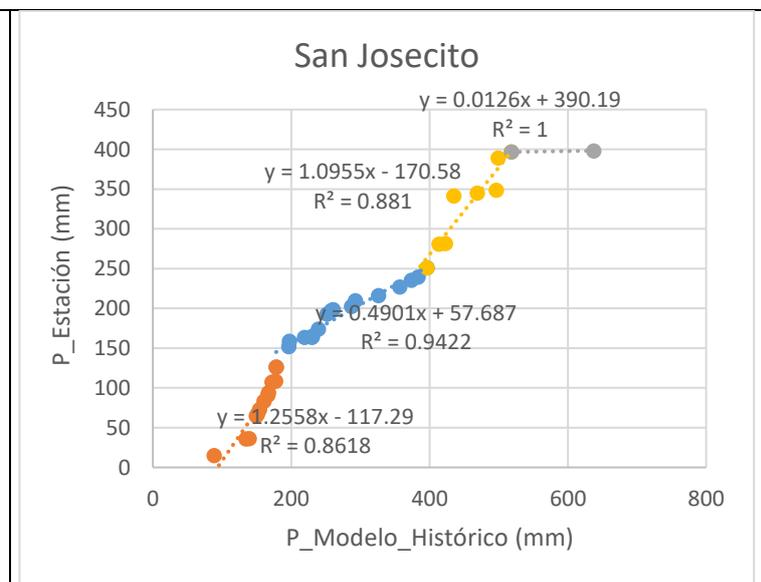
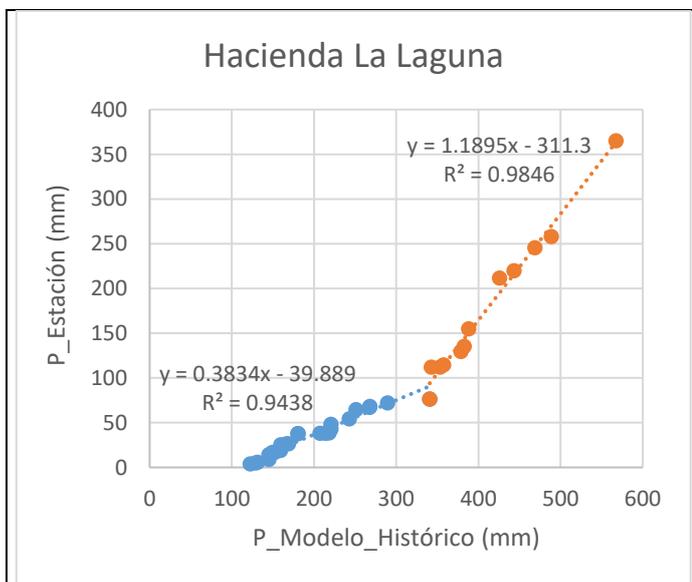
Octubre

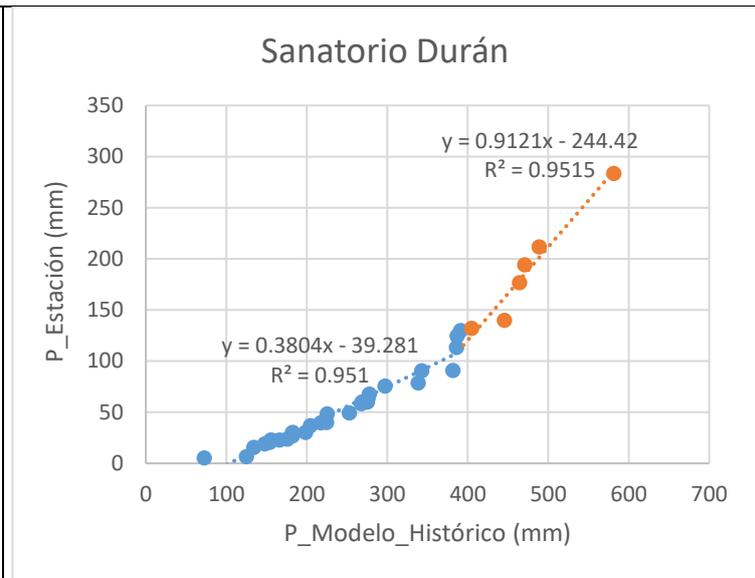
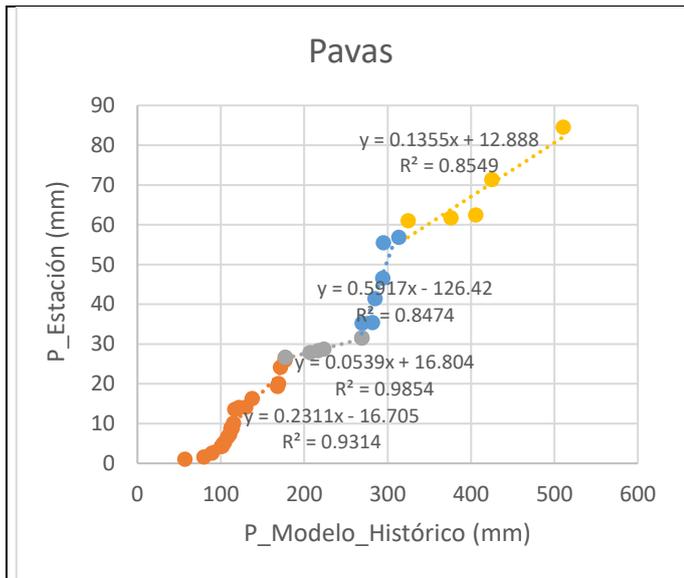


Noviembre

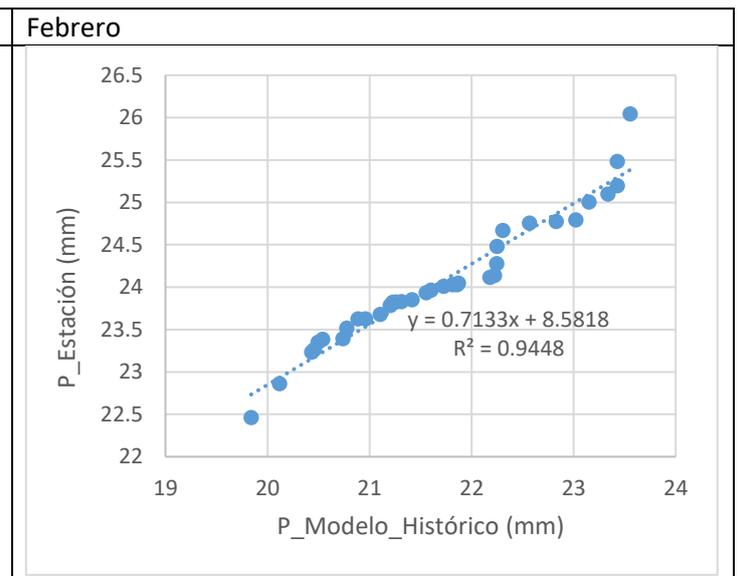
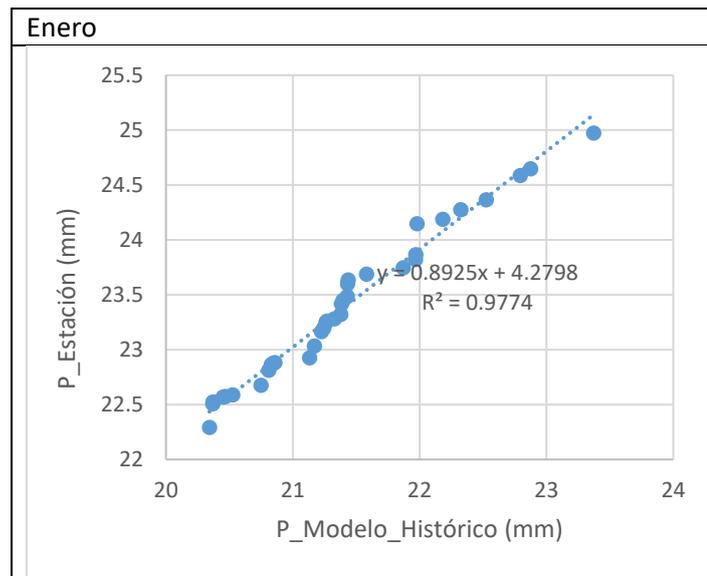


Diciembre



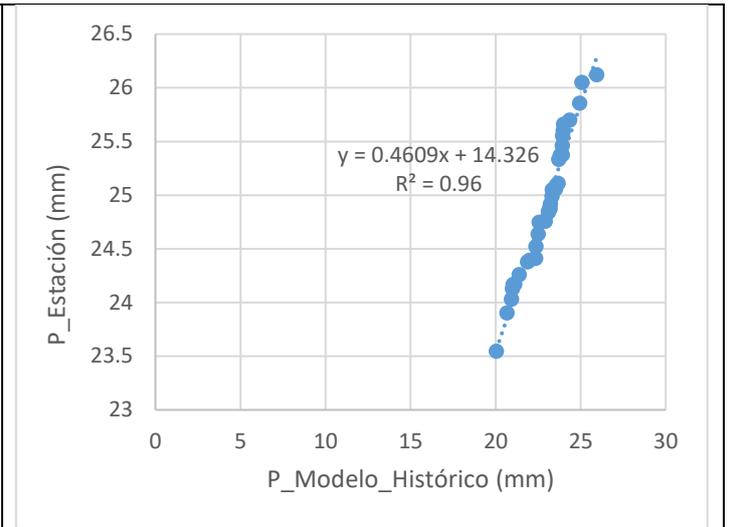
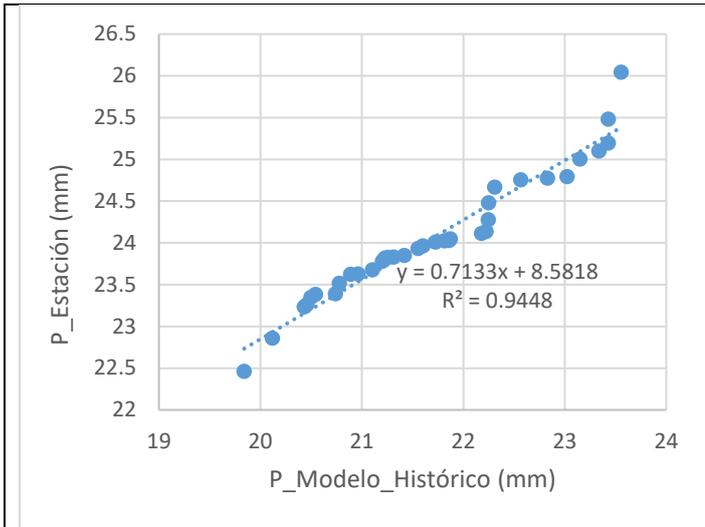


A.1.3.2. Temperatura



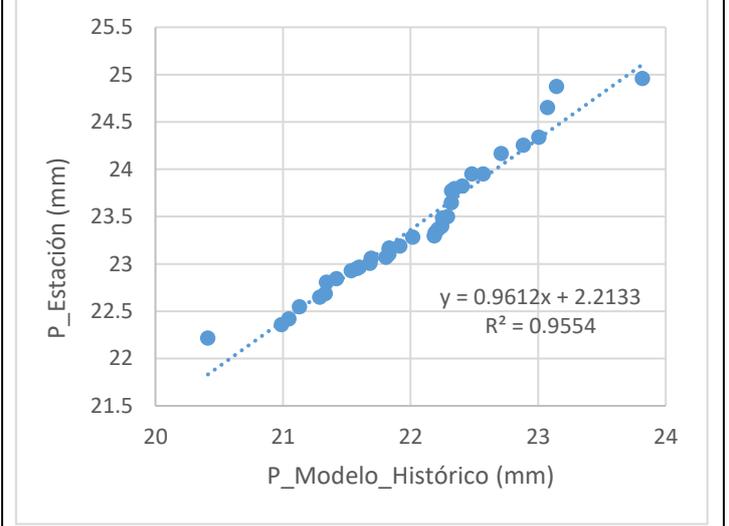
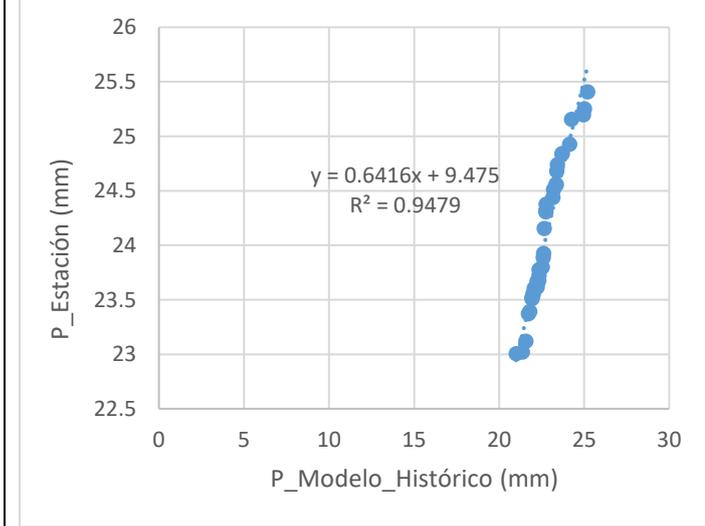
Marzo

Abril



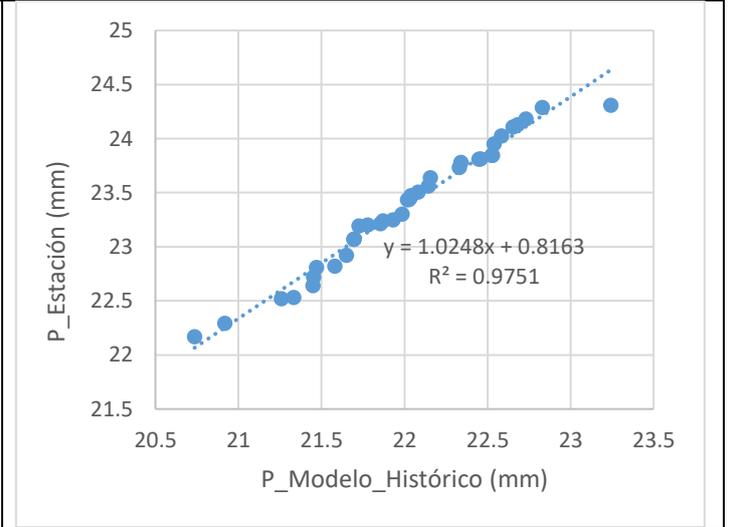
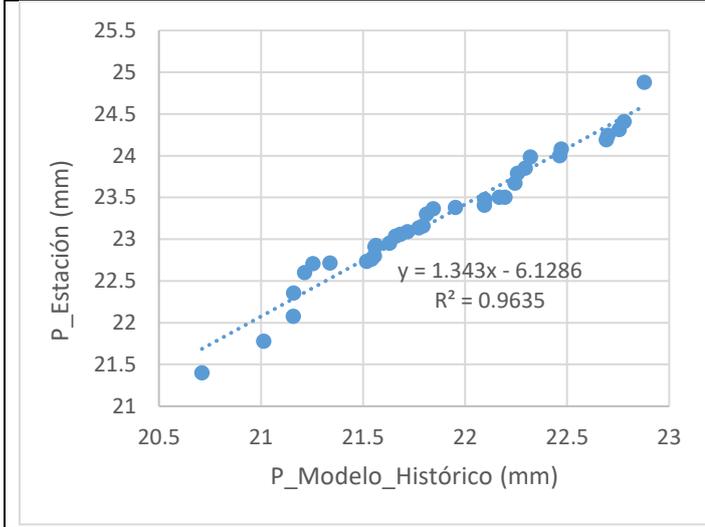
Mayo

Junio



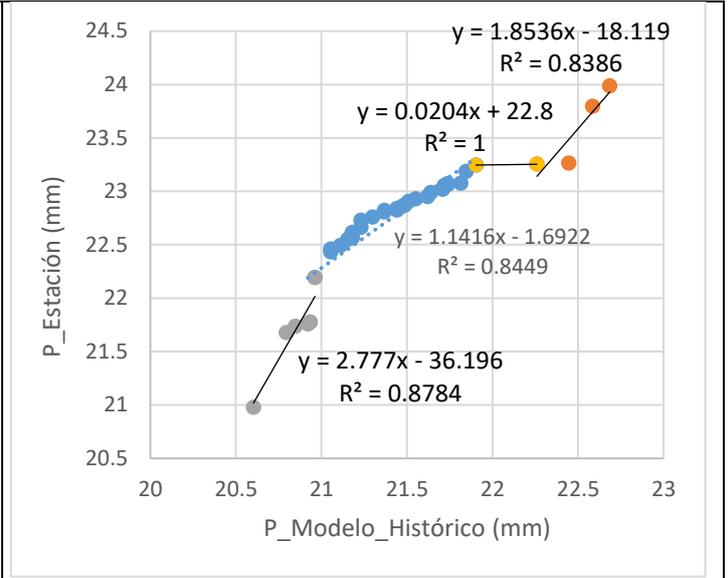
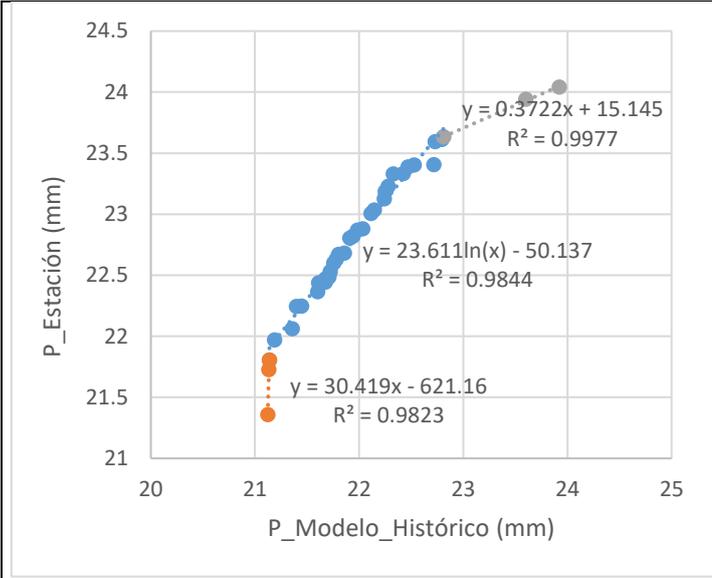
Julio

Agosto



Setiembre

Octubre



Noviembre

Diciembre

