



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Tesina presentada para obtener el grado académico de
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

**“Análisis de la respuesta hidrológica ante un Sistema de Drenaje
Urbano Sostenible en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.”**

Florencia Rocío SRUR

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2020

Prefacio

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la provincia de La Pampa durante el período comprendido entre los años 2017 y 2020 bajo la dirección del Dr. Pablo F. Dornes.

Agradecimientos

Se expresa el agradecimiento a las siguientes personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de tesis:

- Universidad Nacional de La Pampa y Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Mi director Dr. Pablo Dornes.
- Miembros del comité evaluador Mg. Miguel Muñoz y Lic. Carlos Mario Camilletti.
- Cooperativa Popular de Electricidad Obras y Servicios Públicos, en especial a Ing. Pablo Stellin, Sr. Sergio Brozt y Sr. Fabián Espinoza.
- Dirección de Obras Públicas de la Municipalidad de Santa Rosa en especial a Ing. Diego Bosch, Sr. Martín Gonzalo de Elorriaga y M.M.O. Aníbal Fabián Gaitán.
- Área de SIG de la Municipalidad de Santa Rosa en especial a Maria del Carmen Ares y Luis Ariel Chamorro.
- Municipalidad de Santa Rosa.
- Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa.
- Administración Provincial del Agua (APA).
- Fundación Chadileuvú.
- Cart. Mónica Castro
- Lic. Maite Betelu
- Ing. Hugo Ramiro Paez Campos
- Mag. Rocío Comas
- Lic. María Julia Ochoa
- Mi familia.
- Toda la gente que amo y quiero que me ayudaron en esta etapa académica de mi vida.

21 de Agosto de 2020

Florencia Rocío SRUR

**DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA**

RESUMEN

La ciudad de Santa Rosa ha sufrido de eventos de inundación vinculados con la creciente impermeabilización de la ciudad, afectando negativamente la calidad de vida de sus pobladores. Como alternativa ampliamente difundida, los Sistemas de Drenaje Urbanos Sostenibles (SDUS) como la cosecha de agua, supone la reducción de la escorrentía a partir de la colección de agua de lluvia en techos de edificios, su retención en cisternas y su uso. El objetivo general de esta tesina es evaluar la factibilidad de implementación de un SDUS a partir de cosecha, retención y uso de agua en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa. Para ello, se simuló la respuesta hidrológica y se realizó el balance hídrico con el modelo hidrológico-hidráulico SWMM 5.1 en una cuenca del barrio Centro de la ciudad en diferentes escenarios para distintos eventos de precipitación. La utilización de SDUS con cosecha de agua para las funciones de almacenamiento y uso de agua de lluvia son factibles pero, la modificación del caudal de salida de la cuenca solo es importante con precipitaciones de tiempos de recurrencia bajos. Se recomienda la combinación de distintos tipos de SDUS, como techos verdes, cunetas verdes, depósitos de detención en superficie, entre otros, para aprovechar sus características de manera holística.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que la composición y distribución del sistema de drenaje pluvial influye de gran manera en la respuesta hidrológica de la ciudad y que otros factores involucrados son las bajas pendientes en algunas partes del sistema que pueden generar encharcamiento y/o disminución en la velocidad del flujo y la permeabilidad y/o abstracción en las cuencas por presencia de parques o plazas.

Palabras clave: Hidrología Urbana, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, Modelación hidrológica, La Pampa

ABSTRACT

The city of Santa Rosa has suffered from flood events linked to the increasing impermeabilization of the city, negatively affecting the quality of life of its citizens. As a widespread alternative, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), such as rain harvesting, entails the reduction of runoff flow from the collection of rainwater on building roofs, its retention in tanks and its reuse. The general objective of this thesis is to evaluate the feasibility of implementing SUDS for harvest, retention and reuse of rainwater in the city of Santa Rosa, La Pampa. For this, it was used the hidrological-hidraulic model SWMM 5.1 for the analysis of hydrological response and the water balance in a basin of the city downtown district in different scenarios for various precipitation events. The use of SDUS with rain harvesting for water storage and use is possible, but the modification of the basin flow is only significant with rainfall of low recurrence times. The combination of different types of SUDS, such as green roofs, green gutter, surface detention tanks, among others, is recommend to take advantage of its characteristics holistically.

According to the results obtained, it is concluded that the composition and distribution of the storm drain system greatly influences the hydrological response of the city and that other factors involved, are the low slopes in some parts of the system that can generate impermeabilization and / or decrease in flow velocity and permeability and / or abstraction in the basins due to the presence of parks.

Key words: Urban Hydrology, Sustainable Urban Drainage Systems, Hydrological modelling, La Pampa

Índice general

1.	Introducción	1
1.1-	Santa Rosa: situación local. Alcances de la tesina.....	9
1.2-	Objetivos.....	10
1.2.1 –	Objetivo general.....	10
1.2.2 –	Objetivos específicos	10
2.	Materiales y Métodos	11
2.1-	Área de estudio	11
2.1.1.-	Clima.....	12
2.1.2.-	Hidrología Superficial.....	14
2.1.3.-	Hidrología subterránea.	16
2.1.4-	Saneamiento urbano: gestión pluvial, cloacas y agua potable. 18	
2.1.5.-	Criterios para la priorización y selección de cuencas para modelación hidrológica-hidráulica.....	22
2.2-	Modelación Hidrológica-Hidráulica SWMM.....	23
2.2.1.-	Análisis pluviométrico	30
2.2.1.1.-	Clasificación de precipitaciones anuales.....	30
2.2.1.2.-	Recurrencia de precipitaciones y curvas I.D.F.....	30
2.2.1.3.-	Tormentas de diseño.....	35
2.2.2.-	Constitución y discretización de elementos componentes del sistema.	35
2.2.3.-	Muestreo de datos y observación a campo.....	38
2.2.4.-	Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico-hidráulico.....	39
2.2.5.-	Evaluación de respuesta hidrológica.	41
2.2.6.-	Planteamiento de escenarios para cuenca SC.	41
2.3.-	Balance Hídrico	44

3.	Resultados y Discusión	45
3.1-	Modelación Hidrológica-Hidráulica SWMM.....	45
4.1.2.-	Modelo conceptual.	45
4.1.3.-	Análisis pluviométrico. Clasificación de precipitaciones anuales.	46
4.1.3.1.-	Recurrencia de precipitaciones	48
4.1.3.2.-	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (.ID.F.).	50
4.1.3.3.-	Tormentas de diseño.....	56
4.1.3.-	Discretización espacial de las subcuencas SV1 y SV2 en SWMM	59
4.1.4.-	Muestreos de Altura de Pelo de Agua	62
4.1.5.-	Análisis de sensibilidad.	64
4.1.5.1.-	Sensibilidad a la estructura.	64
4.1.5.2.-	Sensibilidad a N Manning.	67
4.1.5.3.-	Sensibilidad al almacenamiento en depresión	71
4.1.5.4.-	Sensibilidad al Coeficiente de Descarga de sumideros.....	72
4.1.6.-	Calibración y validación de parámetros sensibles en SV2.	74
4.1.7.-	Discretización espacial de la subcuenca urbana SC en SWMM76	
4.1.8.-	Validación de valores calibrados en la subcuenca SC.	77
	En la Figura 61, s	77
4.1.9.-	Evaluación de Respuesta Hidrológica en la ciudad.	78
4.1.10.-	Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible en diferentes escenarios y eventos.....	80
4.2.-	Balance Hídrico	85
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	88
5.	Bibliografía.....	91

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa	11
Figura 2. Precipitaciones extremas diarias y mensuales de Santa Rosa para el período 1961-2018 (SMN, 2019)	12
Figura 3. Mapa de isohietas de Argentina (A) período 1961-1990 (A) y (B) período 1981-2010 (B) (SMN, 2019).....	13
Figura 4. Frecuencia de días con precipitación de Argentina (A) período 1961-1990 y (B) período 1981-2010 (SMN, 2019).....	13
Figura 5. Climograma de Santa Rosa, La Pampa, para el período 1981-2010. (SMN, 2019)	14
Figura 6. Ubicación geográfica de Laguna Don Tomás, Bajo Giuliani y plantas de tratamiento Norte y Sur, La Pampa.	15
Figura 7. Canales a cielo abierto que recolectan, para transportar a la Laguna Don Tomás, excesos de precipitación que no logran ser captados por Sistema Menor. Canal ubicado en el final de calle Sarmiento (A) y en el final de la Avenida San Martín Oeste (B).....	16
Figura 8. Acuíferos de la provincia de La Pampa (A) y acuífero Toay-Santa Rosa-Aguil-Catrilo (B) (Giai y Tullio 1998)	17
Figura 9. . Mapa de isopiezas (msnm) y red de flujo para el mes de julio de 2017. (Tullio, et al 2015).....	18
Figura 10. Esquema del sistema de cloacas realizado por la Dirección de Hidráulica de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (Polanco, 2013).	19
Figura 11. Acueducto Río Colorado, localidades abastecidas y plantas de tratamiento (APA).	20
Figura 12. Croquis de perforaciones realizadas por APA y OSN fuera del eje urbano de la ciudad de Santa Rosa. (Tullio, et al. 2015).....	20
Figura 13. Plano de cuencas y red pluvial de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (MSR, 2017).	21
Figura 14. Localización de subcuencas Centro (SC delimitado en color rojo) y Villa Elvina (SV delimitado en color amarillo) en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	22
Figura 15. Modelo conceptual del sistema de drenaje urbano organizados como módulos en SWMM (Adaptado de Concha Jopia, 2007).....	24
Figura 16. Modelo conceptual teórico de escorrentía superficial en SWMM (Rossmann, 2005).	28
Figura 17. Estrategia para la modelación de dos subcuencas urbanas en SWMM 5.1.	29

Figura 18. Esquema del modelo SWMM 5.1 en manzanas. A) Calles como conductos. B) Calles como subcuencas y conductos.....	36
Figura 19. Esquema del modelo SWMM 5.1 en las salidas del Sistema. Se representan calles como conductos (A) y calles como subcuencas y conductos (B).	37
Figura 20. Final de subcuencas y punto de muestreo en SV1 y SV2. Vertedero al final de calle Las Heras en Barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa.	38
Figura 21. Punto de muestreo para validación de SC. Acceso a Laguna Don Tomás por Avenida San Martín Oeste, Santa Rosa, La Pampa.....	39
Figura 22. Esquema de procedimiento para análisis de sensibilidad, calibración y modelación en SWMM de las áreas de estudio.	39
Figura 23. Mapa de edificios existentes localizados en el área de interés, Santa Rosa, La Pampa.	42
Figura 24. Modelo conceptual de balance hídrico para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	45
Figura 25. Precipitaciones anuales de Santa Rosa, La Pampa para la serie 1951-2018 y rangos de clasificación pluviométrica obtenida a partir de quintiles.....	48
Figura 26. Curvas de período de retorno (A) y de probabilidad de excedencia porcentual (B) de precipitaciones diarias para la serie 1951-2018 para Santa Rosa, La Pampa. .	49
Figura 27. Curvas de período de retorno (A) y de probabilidad de excedencia porcentual (B) de precipitaciones diarias para la serie 1951-2018 para Santa Rosa, La Pampa. En puntos rojos se marcan 5 precipitaciones registradas en los años 2012, 2013, 2014, 2016 y 2017. ().....	50
Figura 28. Función de Gumbel para precipitaciones máximas de 24 horas para Santa Rosa, La Pampa.	51
Figura 30. Histograma de Densidad y curva de Probabilidad de Gumbel con un intervalo de confianza del 95% para precipitaciones de 24 horas de precipitaciones máximas de Santa Rosa, La Pampa.....	51
Figura 30. Línea de tendencia potencial para la relación entre Intensidad de precipitación (mm/hs) y duración (t) en minutos para precipitaciones con tiempo de recurrencia de 2 (A), 5 (B), 10(C), 25 (D), 50 (E) y 100 (F) años para precipitaciones de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa. Para todos los períodos de retorno el valor de R^2 es de 0,99.....	54
Figura 31. . Línea de tendencia potencial para la relación ($R^2 = 0,9259$) entre Constante de Regresión (d) y Período de Retorno (TR) en años para precipitaciones de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.....	55
Figura 32. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I.D.F.) para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	56

Figura 33. Tormentas de Diseño para tiempos de recurrencia de 2 (A), 5 (B), 10 (C), 25 (D), 50 (E) y 100 (F) años para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.....	57
Figura 34. Regionalización de precipitaciones medias (mm) de duración de una hora. (Devoto, 2002 en Bertoni, 2004)	58
Figura 35. Esquema de conceptualización del modelo en subcuenca SV1 constituida a partir de una porción de un barrio de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (A) con la descripción de sus componentes (B).	60
Figura 36. Esquema de conceptualización del modelo en subcuenca SV2 constituida a partir de una porción de un barrio de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (A) con la descripción de sus componentes (B).	61
Figura 37. Esquema conceptual del modelo de sección transversal de calles para los conductos (A) y para el final de la subcuenca (B) de forma irregular para las subcuencas SV1 y SV2. En las ordenadas se encuentra la elevación (m) de la sección y en las abscisas la longitud perpendicular del conducto (m).	62
Figura 38. Toma de medidas de altura de pelo de agua (m) en la subcuenca SV.....	62
Figura 39. Hietogramas de eventos reales sucedidos en la ciudad de Santa Rosa los días 7 de mayo (A), 27 de septiembre (B) y 4 de noviembre (C) del año 2018 y medición de pelo de agua en final de la cuenca SV.	63
Figura 40. Hietogramas de eventos reales sucedidos en la ciudad de Santa Rosa los días 13 de noviembre (A), 8 de diciembre (B), 10 de diciembre (C) del año 2018 y 13 de febrero del año 2019 (D) y medición de pelo de agua en final de la cuenca SC.....	64
Figura 41. Relación de alturas de pelo de agua (m) en la calle final de las subcuencas SV1 y SV2 correspondientes a una porción del barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 (A) y 100 (B) años de tiempo de recurrencia.....	65
Figura 42. Relación de caudales de salida del sistema menor (m ³ /s) de las subcuencas SV1 (en líneas naranjas) y SV2 (en líneas verdes) correspondientes a una porción del barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 (A) y 100 (B) años de tiempo de recurrencia.	65
Figura 43. Relación de caudales de salida del sistema mayor (m ³ /s) de las subcuencas SV1 y SV2 correspondientes a una porción del barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 (A) y 100 (B) años de tiempo de recurrencia.....	66
Figura 44. Relación entre alturas de pelo de agua (m) simulado y observado para las subcuencas SV1 y SV2 correspondientes al barrio Villa Elvina para una precipitación del día 7 de mayo (A), 27 de septiembre (B) y 04 de noviembre (C) del año 2018 en Santa Rosa, La Pampa.	66

Figura 45. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.....	68
Figura 46. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.....	68
Figura 47. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.....	69
Figura 48. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.....	69
Figura 49. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para conductos en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años....	70
Figura 50. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para conductos en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.	70
Figura 51. Comparación resultados de diferentes valores de almacenamiento en depresión de áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.	71
Figura 52. Comparación resultados de diferentes valores de almacenamiento en depresión de áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.	71
Figura 53. Comparación resultados con diferentes valores de almacenamiento en depresión de áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) (B) de la última calle del sistema SV2 con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.	72
Figura 54. Comparación resultados de valores de Almacenamiento en depresión de áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle	

del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.....	72
Figura 55. Comparación resultados de valores de Coeficiente de Descarga de sumideros en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.....	73
Figura 56. Comparación resultados de valores de Coeficiente de Descarga de sumideros en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m ³ /s) de la última calle del sistema SV2 con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.....	73
Figura 57. Altura de pelo de agua (m) simulada, en línea continua negra, y observada, en puntos magenta, para la subcuenca urbana SV2 en el barrio Villa Elvina con precipitaciones ocurridas en los días 7 de mayo (A), 27 de septiembre (B) y 4 de noviembre (C) del año 2018 de 8; 33,8 y 12,4 mm respectivamente en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	75
Figura 58. Esquema de conceptualización del modelo en subcuenca SC en escala reducida (A) y ampliada (B) constituida a partir del barrio Centro de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	76
Figura 59. Esquema conceptual del modelo de sección transversal para las calles (A) y las avenidas con boulevards (B) de la subcuenca SC. En las ordenadas se encuentra la elevación (m) de la sección y en las abscisas la longitud perpendicular del conducto (m).	77
Figura 60. Altura de pelo de agua (m) modelado, en línea continua negra, y observado, en puntos magenta, para la subcuenca urbana SC en el barrio Centro, Santa Rosa, La Pampa.	78
Figura 61. Hidrogramas de salidas de subcuenca SC por calles Sarmiento (línea azul), Avenida Uruguay (línea verde) y Avenida San Martín (línea roja) para tormentas de diseño de tiempo de recurrencia de 2 (A), 5 (B), 10 (C), 25 (D), 50 (E) y 100 (F) años.	79
Figura 62. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m ³ /s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 2 años.....	81
Figura 63. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m ³ /s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 5 años.....	82
Figura 64. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m ³ /s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 10 años.....	82

Figura 65. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m ³ /s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 25 años.	83
Figura 66. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m ³ /s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 50 años.	83
Figura 67. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m ³ /s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 100 años.	84
Figura 68. Comparación entre el porcentaje de escorrentía en la salida de la cuenca y el porcentaje de almacenamiento de la cuenca resultante del balance hídrico para los escenarios SIN SDUS (1), con SDUS en espacios verdes y edificios en construcción (6) y SDUS en espacios verdes, edificios en construcción y existentes (8) con tormentas de diseño de 2 (A) y 5 (B) años para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	86
Figura 69. Almacenamiento final (m ³) de la cuenca resultante del balance hídrico para los escenarios SIN SDUS (1), con SDUS en espacios verdes y edificios en construcción (6) y SDUS en espacios verdes, edificios en construcción y existentes (8) con tormentas de diseño de 2 (A) y 5 (B) años de recurrencia para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	87

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de continuidad	26
Ecuación 2. Ecuación de momentum	26
Ecuación 3. Ecuación de Manning	26
Ecuación 4. Número de curva.....	27
Ecuación 5. Regla de Laplace	30
Ecuación 6. Tiempo de recurrencia.....	31
Ecuación 7. Función de distribución de probabilidad	31
Ecuación 8. Función de probabilidad	32
Ecuación 9. <i>alfa</i>	32
Ecuación 10. <i>beta</i>	32
Ecuación 11. <i>S</i>	32
Ecuación 12. \bar{x}	32
Ecuación 13. Variable reducida <i>YT</i>	32
Ecuación 14. Precipitación X_T	32
Ecuación 15. Corrección por intervalo fijo	33
Ecuación 16. Intensidad de precipitación.....	33
Ecuación 17. Intensidad máxima de precipitación	34
Ecuación 18. Logaritmo de <i>i</i>	34
Ecuación 19. <i>Y</i>	34
Ecuación 20. <i>Y</i>	34
Ecuación 21. X_1	34
Ecuación 22. <i>d</i>	34
Ecuación 23. Intensidad de precipitación.....	34
Ecuación 24. Coeficiente de descarga de sumideros.....	37
Ecuación 25. Área de captación	43
Ecuación 26. Volumen total de cisternas	43
Ecuación 27. Volumen de cilindro	43
Ecuación 28. Balance hídrico	46
Ecuación 29. Balance hídrico simplificado	46
Ecuación 30. Intensidad para caso de estudio.....	55
Ecuación 31. Volumen total cisternas de edificios	80
Ecuación 32. Altura de cisternas para edificios.	80

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de componentes visuales y detalle de sus parámetros en SWMM.	25
Tabla 2. Valores de número de curva (CN) para suelos de tipo A bajo distintos usos..	28
Tabla 3. Coeficientes para las relaciones de lluvia con duración de 24 horas.....	33
Tabla 4. Cantidad de objetos de la estructura del modelo utilizado para cada subcuenca estudiada.	38
Tabla 5. Detalle y rangos de valores utilizados para evaluar la sensibilidad de los parámetros del modelo SWMM en las subcuencas SV1 y SV2.	40
Tabla 6. Escenarios planteados para la modelación hidrológica con código de color y número.	41
Tabla 7. Coeficientes de escorrentía (C) para diferentes tipos de superficies urbanas calculados para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.....	44
Tabla 8. Intervalos porcentuales de quintiles de precipitación (mm) para la clasificación pluviométrica de años “Muy secos”, “secos”, “normal”, “húmedo” y “muy húmedo”.	47
Tabla 9. Clasificación pluviométrica de serie 1951-2018 para Santa Rosa, La Pampa.	47
Tabla 10. Tiempos de recurrencia (años) y probabilidad de excedencia (%) de precipitaciones ocurridas en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa en el período 2012-2017.....	49
Tabla 11. Probabilidad de ocurrencia de precipitación corregida por intervalo fijo en función a una variable reducida en función de distribución de Gumbel para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.	52
Tabla 12. Probabilidad de ocurrencia de precipitación corregida por intervalo fijo en función a una variable reducida en función de distribución de Gumbel para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.	52
Tabla 13. Intensidades de precipitación máximas (mm/hs) para tiempos de duración de hasta 24 horas en intervalos de 1, 2 y 6 horas para los tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.	53
Tabla 14. Resumen de la regresión potencial realizada para los distintos Tiempos de Retorno considerados para la construcción de curvas IDF para la serie de precipitaciones anual de 1951 a 2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.	53
Tabla 15. Regresión potencial para los períodos de retorno (TR) 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años en función de su constante de regresión (d) para obtener los valores del Término constante de regresión (K) y el Coeficiente de regresión (m) para las precipitaciones de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.....	54

Tabla 16. Valores de Intensidad (mm/h) para precipitaciones de períodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años con intervalos de duración de 5 minutos hasta una hora para registro pluviométrico de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.....	55
Tabla 17. Precipitaciones (mm) y alturas de pelo de agua máximas (cm) observadas en diferentes eventos en las cuencas SV y SC en Santa Rosa, La Pampa.	63
Tabla 18. Resultados de test de correlación de Pearson con valor de correlación y p valor para las subcuencas SV1 y SV2 en contraste con los valores observados. En negrita se muestran los valores de p que resultan significativos.....	67
Tabla 19. Valores de N de Manning, almacenamiento en depresión para áreas permeables e impermeables de las subcuencas y coeficientes de descarga de sumideros que mejores resultados dieron en base a la comparación con datos observados para la cuenca urbana SV2, Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa.....	74
Tabla 20. Cuantificación de objetos constituidos en la subcuenca SC.	77
Tabla 21. Volúmenes de escorrentía superficial (m ³) para tres salidas del sistema SC por la calle Sarmiento, Avenida Uruguay y San Martín para tormentas de diseño de tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.	80
Tabla 22. Comparación porcentual de escorrentía pico (m ³ /s) simulado para el escenario sin SDUS con respecto a los demás escenarios planteados para diferentes eventos.	84
Tabla 23. Balance hídrico para la subcuenca SC considerando eventos de precipitación con tiempos de recurrencia de 2 y 5 años para los escenarios planteados como SIN SDUS, SDUS en espacios verdes y edificios en construcción y SDUS en espacios verdes, edificios en construcción y existentes. El volumen precipitado sobre la cuenca representa el 100% del agua del sistema, el volumen de salida es la sumatoria de todos los volúmenes de las tres salidas del sistema por las calles Sarmiento, Don Bosco y Avenida San Martín.....	86

1. Introducción

La tasa de crecimiento poblacional y las innovaciones tecnológicas afectan la evolución temporal y espacial de los asentamientos urbanos. Con respecto al primer punto, los países en desarrollo han duplicado el número de habitantes que vive en zonas urbanas desde la década de 1960. De esta manera, se prevé que para el año 2020 la población mundial será de 8,5 billones de personas, de las cuales en América Latina el 85% vivirá en ciudades (Kreimer, *et al.* 2001; González Uriarte, 2004; Sanchez Román, 2010; BM, 2019). Esto resulta en un consecuente aumento de las construcciones edilicias adecuadas para el bienestar de la población, por lo que, se puede impactar el ciclo hidrológico de la cuenca urbana cuando la urbanización no se planifica adecuadamente o las infraestructuras de saneamiento quedan mal dimensionadas y/o se presenta una reducción marcada de la permeabilidad del suelo por asfaltado y demás construcciones (Guo, 2001; Kreimer, *et al.*, 2001; Dorado, *et al.*, 2002; Brière y Pizarro, 2005, Ruberto, *et al.*, 2006; Depettris y Rohrmann., 2007, Villalba, *et al.*, 2012; Martínez Candelo, 2013; Brighenti, *et al.*, 2014; Palla y Gnecco 2015). Una de las consecuencias del cambio en el ciclo hidrológico es la ocurrencia de inundaciones o anegamientos. Pese a que algunos autores diferencian estos términos, (eg. AGAI, 2004; González Uriarte, *et al.*, 2004; Ferrando, 2006; Cisneros, *et al.*, 2012) se los suele utilizar como sinónimos. Definidos como la rápida llegada al pico del hidrograma y la consecuente acumulación temporal de agua en una porción del terreno debido a un mal drenaje. Las inundaciones constituyen fenómenos complejos que tienen componentes tanto ambientales (clima, geomorfología, topografía) como antrópicas, donde las causas de anegamiento pueden ser múltiples dependiendo de las características del área de estudio. Es necesario remarcar la diferencia en el comportamiento de un sistema natural respecto a uno urbano, de esta manera, para referirse y describir el comportamiento del ciclo hidrológico que ha sido modificado antrópicamente por infraestructuras urbanísticas se acude a la Hidrología Urbana (Aranda, 2010; WMO, 2019). Pese a que las ecuaciones que describen el movimiento del agua son las mismas que en la hidrología clásica de ambientes naturales, en ambientes urbanos los componentes de entrada y/o

salida del balance hídrico pueden estar alterados de manera antrópica (IGME, 2003; Aranda, 2010).

Para tener un mejor entendimiento del funcionamiento de la cuenca urbana y poder realizar una gestión adecuada se utilizan modelos hidrológicos. Un modelo hidrológico representa una aproximación al sistema real. Sus variables hidrológicas mensurables son las entradas y salidas del sistema y su estructura constituye un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan y conectan estas variables. Existen dos tipos de modelos hidrológicos, los denominados “modelos físicos”, que representan el sistema en escala reducida o análoga, usando sistemas similares en cuanto a características físicas para predecir el comportamiento. Y los “modelos abstractos”, que representan al sistema como funciones matemáticas, los cuales a su vez pueden ser conceptuales o de base física. Además, se puede clasificar los mismos de acuerdo al estudio de sus dimensiones espaciales (x,y,z) siendo entonces uni, bi o tridimensionales. Por otro lado, un modelo puede ser determinístico, es decir que un tipo de entrada determinada siempre da como resultado un solo tipo de salida o estocástico cuando un tipo de entrada conlleva un cierto grado de aleatoriedad en las salidas posibles (Chow, *et al*, 1994; Beven, 1996, Beven, 2000, Beven, 2002; Barnsley, 2007).

Existe una amplia variedad de modelos hidrológicos adecuado para cada necesidad de estudio. El modelo de gestión de aguas pluviales *Storm Water Magement* (SWMM) de la Asociación de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) es un modelo computacional dinámico de simulación de escorrentía que considera distintos procesos hidrológicos que se producen a la entrada y salida de un sistema urbano. Entre sus aplicaciones se reconoce el diseño y dimensionamiento de componentes de la red de desagüe pluvial. Además, por ser un modelo de plataforma libre, es de amplio uso en el campo de la modelación de sistemas hidrológicos urbanos (e.g. Zaghoul, 1983; Warwick, *et al*, 1991; Bennis y Crodebbu, 2007; Chaosakul, *et al*, 2011; Chow, *et al*, 2012; Dorado, *et al*, 2012; Fletcher, *et al*, 2012; Abellan García, 2013; Sanchez Román y Martinez Gonzalez, 2013; Barrios Acuña, *et al*, 2014; Jia, *et al*, 2014; Rosa, *et al*, 2014; Jimenez y Joya 2015; Knighton, *et al*, 2016; Rodriguez Sánchez, 2013).

En el caso particular de los sistemas urbanos, la impermeabilización del suelo, en relación con la planificación subdimensionada, conlleva a un excedente en la escorrentía superficial (Guo, 2001; Kreimer, *et al.* 2001; Dorado, *et al.* 2002; Gonzalez Uriarte, *et al.* 2004; Villalba, *et al.*, 2012; Brighenti, *et al.*, 2014; Palla y Gnecco 2015). Como consecuencia, disminuye la calidad de vida de las personas, ya sea por pérdida material, de infraestructura y/o humana. Por esta razón, existen en la actualidad diferentes tipos de obras urbanas que cuentan con estructuras “verdes”, de bajo impacto o sustentables que complementan los conocimientos del ciclo hidrológico urbano con las necesidades de la población.

Los sistemas urbanos cuentan con infraestructuras de saneamiento, sistemas de distribución de agua potable, transporte de aguas servidas y de aguas pluviales. En el transporte de aguas de lluvia, existen dos tipos de sistemas de drenaje urbano. Los denominados “sistemas convencionales”, donde el agua de lluvia que escurre por las calles es colectada por medio de sumideros y transportados, en la mayoría de los casos, de manera subterránea hacia cuencos, ríos o mares. Se suele utilizar para estos drenajes una denominación para clasificar dos partes del sistema urbano, según si el agua de lluvia es transportada por la calle como escorrentía superficial o por las cañerías del drenaje pluvial. Aunque existen muchos términos para esta clasificación, en Argentina suele usarse el término “sistema menor” para referirse a los colectores subterráneos y “sistema mayor” para los excedentes hídricos que circulan como escorrentía superficial (Riccardi, 1997; Burgos, 2007; Carner, *et al.*, 2013; Tyson, *et al.*, 2013). Estos drenajes suelen tener problemas de infraestructura debido a que pueden quedar mal dimensionados o no contar con el mantenimiento correspondiente. En muchos casos el sistema de sumidero superficial y cañería subterránea cuenta con un diseño que resulta difícil de adecuar a futuro en coherencia con el crecimiento poblacional (Wong, 2000; Delleur, 2003; Torres, *et al.*, 2019). Además, su correcto funcionamiento es muy susceptible a ser afectado por la presencia de residuos sólidos urbanos que, al ser transportados por el agua, tapan los sumideros y bloquean el acceso al sistema menor de la ciudad (Arce, 2011; Nugra Loja, 2013). Por otro lado, el agua que fluye en ambos sistemas, posee una calidad degradada y puede arrastra consigo grandes cantidades de contaminantes como sedimentos, metales pesados, aceites, entre otros, que son evacuados a humedales, ríos, mares o zonas de sacrificio

(Kessler, 2011; Drayna, *et al.*, 2010; Curriero, 2001). Por estas razones, se encontraron soluciones sustentables tanto económica, temporal y sobre todo ambientalmente.

Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SDUS) constituyen sistemas de drenaje con diferentes características y constituciones que, además de tener como principal objetivo el control pluvial para evitar inundaciones, protege los sistemas naturales integrando el tratamiento de aguas de lluvia en el paisaje antrópico. Esto tiene impacto en el ciclo hidrológico urbano y en la calidad de vida de la población. Existen muchos tipos de SDUS que se pueden implementar de manera individual o conjunta dependiendo del área de interés y de los objetivos del planeamiento urbano (Woods-Ballard, *et al.* 2007; Rodriguez Bayon, 2005; Perales Momparler, 2007; Danielsen Sørup, *et al.* 2016; Scholz, 2016; Campisano, *et al.* 2017). Aunque no existe una categorización internacional sobre los tipos de SDUS, la más recurrente separa en dos tipologías principales, “medidas no estructurales” y “medidas estructurales”.

Las medidas no estructurales no actúan directamente sobre la red ni conllevan a la construcción de infraestructura alguna. Se trata de medidas ciudadanas o de gestión que incluyen educación ambiental y participación ciudadana. Por ejemplo, en términos de limpieza y mantenimiento, la realización de acciones y procedimientos ante vertidos contaminantes que puedan ser transportados, el control de uso de herbicidas y fungicidas en parques y jardines y/o la colección y reutilización de aguas pluviales por parte del ciudadano como acción individual. Por otro lado, las medidas estructurales adoptan criterios urbanísticos y/o algún grado de elemento constructivo sobre la red. Dentro de estas últimas se distinguen las siguientes:

- “*Techos verdes*”. Se trata de una cubierta vegetal de crecimiento medio que cubre total o parcialmente un techo de cualquier superficie que este previamente recubierto por una membrana impermeable. Estos interceptan y retienen el agua de lluvia, actuando además, como una capa de aislante térmico en el edificio ayudando a compensar el efecto “isla de calor” de las ciudades.
- “*Pavimentos permeables*”. Son alternativas al pavimento convencional que cuentan con la capacidad de dejar pasar el agua de lluvia ayudando

a su infiltración, disminuyendo de esta manera la escorrentía. Además, la porosidad de los materiales sirve como filtro para contaminantes. Pueden ser de césped (con o sin refuerzo), bloques impermeables con juntas permeables, bloques y baldosas porosas o pavimentos continuos porosos.

- *“Franjas Filtrantes”*. Porciones del suelo anchas y con poca pendiente, intermedias entre zonas duras y receptoras de aguas de escorrentía, que son vegetadas para cumplir como amortiguador.
- *“Pozos y zanjas de infiltración”*. Se trata de pozos poco profundos de entre 1 a 3 metros rellenos con material drenante (sintético o natural) dispuestos para que reciban la escorrentía generada por superficies impermeables contiguas.
- *“Drenes filtrantes”*. Zanjas poco profundas rellenas con material drenante que pueden o no contar con estructura interior de transporte y almacenamiento. Captan y filtran la escorrentía de superficies impermeables contiguas.
- *“Cunetas verdes”*. Son depresiones lineales de base ancha y talud tendido cubiertas de césped que almacenan el agua de escorrentía y disminuyen su velocidad.
- *“Depósitos de infiltración”*. Depresiones del terreno vegetadas diseñadas para almacenar e infiltrar gradualmente el agua de escorrentía.
- *“Depósitos de detención en superficie”*. Depósitos diseñados para retener y almacenar temporalmente los volúmenes de escorrentía generados aguas arriba. Favorecen la sedimentación y reducción de contaminantes.
- *“Estanques de retención y humedales”*. Lagunas artificiales con lámina permanente de agua y vegetación acuática tanto superficial como sumergida, cuentan con la capacidad de almacenar por largos períodos de tiempo el agua proveniente de escorrentía y favorecen la sedimentación. La diferencia entre los estanques y los humedales es la profundidad del cuenco, la cantidad y diversidad de vegetación en unos y otros.

- “Cosecha de agua o depósitos de detención subterráneos”. Depósitos tipo cisterna subterráneas que colectan y almacenan agua de lluvia proveniente de techos, superficies impermeables o demás donde la precipitación impacte directamente para su potencial uso no consuntivo como limpieza de espacios comunes, mochilas de inodoros, agua para uso de bomberos en caso de incendio, riego de espacios verdes, entre otros. (Pacey y Cullis, 1986; Perales Momparler y Andrés-Doménech 2007; Abruña, 2008; Kyle, 2012; Danielsen Sørup, *et al.* 2016; Abellan A., 2016; Scholz, 2016; Perini y Sabbion 2017; NSWMSuDS Group, 2019).

Es necesario considerar los objetivos que se desean para la planificación urbana y la heterogeneidad espacial de los distintos tipos de cuencas en su componente climática. De esta manera, los SDUS se encuentran difundidos en diferentes medidas a nivel mundial, lo cual conlleva a su constante mejora técnica y en eficiencia en muchos países del mundo. Este tipo de drenaje sostenible ha sido incorporado en legislaciones como herramientas de buenas prácticas urbanas, como objetivos para revertir el cambio climático y/o aprovechar agua de lluvia en regiones semi áridas. A continuación se mencionan algunos ejemplos de la utilización de estos sistemas en diferentes países de distintos continentes.

En Japón, la cosecha de agua era una práctica cultural que se realizaba de manera individual hasta la década del 1990, pero con la expansión poblacional del país, la necesidad de controlar inundaciones y de abastecer de agua a la población, en 1994 en la Conferencia Internacional de Agua de Lluvia realizada en Tokyo, se remarcó la necesidad de implementar los sistemas de cosecha de agua de lluvia como parte de una serie de medidas gubernamentales. De esta manera, se empezó a implementar SDUS en construcciones, sobre todo en escuelas y dependencias gubernamentales. Esta medida ayudó al control de inundaciones en la ciudad y al aprovechamiento del agua (Fujita, 1994; Harremoës, 1994; IWA-WST, 1994; UNEP, 2002; JFS, 2003). En Malasia, un país tropical con eventos de precipitación torrenciales, el departamento de Riego y Drenaje publica en el año 2000 un manual de manejo de aguas pluviales “Storm Water Management Manual of Malasya” (MSMA) y a partir del 2001 se exige en este país que todos los nuevos desarrollos cumplan

con el manual MSMA para lograr un desarrollo urbano con impacto cero (Ghani, *et al.* 2008; Zakaria, 2015). En China se crea el programa “Ciudades esponja” en el año 2015, en el cual se realizan investigaciones que evalúan las respuestas de los SDUS en la ciudad de Wuhan, la cual fue elegida como primer ciudad piloto debido a su vulnerabilidad a sufrir inundaciones (Qiu, 2015; Li, 2017; Jiang, 2018; Lashford, *et al.* 2019). En Israel, por medio de la organización *Keren Kayemeth Lelsrael - Jewish National Fund* (KKL-JNF), se capta el agua de lluvia en las ciudades y se mejora su calidad para que sea apta para diversos usos consuntivos, como riego de productos agrícolas (Tal, 2006; KKL, 2013 ; KKL, 2016).

En Australia, desde el año 2000, se fomenta y orienta a la investigación y desarrollo de mejores prácticas en el uso y gestión del agua mediante la normativa de Iniciativa Nacional del Agua (NWI). En el año 2009 se publica la Guía Nacional que promueve el uso de SDUS (Akinyemi, 2008; Weber, 2010; Rahman, *et al.* 2011; Fletcher, *et al.* 2015).

En Europa, existen una amplia gama de guías, manuales y herramientas para que cada país, que pertenezca a la Unión Europea, pueda optar por infraestructuras verde en sus construcciones (Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2007; EC, 2013; Perini, 2016; Hansen, *et al.* 2017; Perales Momparler, 2018; EC, 2019). De todas maneras, particularmente en cada país que ha optado la utilización de infraestructuras verdes tiene sus legislaciones, estudios y avances. En el caso de Reino Unido, en el año 2010, se redacta el “Acta de Manejo de Agua e Inundaciones”. Luego, se adoptan los SDUS como una estrategia de adaptación al cambio climático y a partir del 2016, se crea la Guía de Integración de SDUS en Espacios Públicos (Kambites y Owen 2006; Ellis, 2013; Schuetze, 2013; Woods Ballard, 2015; Perini, 2016; Sabbion, 2016).

En algunos países del continente africano, el uso de SDUS como cosecha de agua de lluvia viene de la mano de organizaciones no gubernamentales como UNESCO en la implementación para abastecimiento de agua potable (UNEP, 2006; UNESCO, 2015; Fisher-Jeffes, 2015; Campisano, *et al.* 2017; du Toit, *et al.* 2018).

En el continente Americano también existen varias experiencias con la utilización de SDUS. En Estados Unidos, se reconoce en la década de 1970 el

problema de contaminación debido al arrastre de contaminantes en sistemas de desagües urbanos, al mismo tiempo que se ve una evolución progresiva de avances en la temática hídrica urbana. En 2008, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) crea el Plan de Acción de Infraestructuras Verdes. Este incluye el apoyo institucional para la transición a buenas prácticas con incentivos municipales para la aplicación de SDUS, como descuento en tasas, incentivos urbanísticos, subvenciones, financiación y premios (NYC, 2010; Economides, 2014; EPA, 2017). En Latinoamérica, entre los años 2009 y 2010, el Banco Mundial crea el programa “Agua azul para ciudades verdes” y selecciona ocho ciudades de países que habían demostrado desarrollar y/o tener interés en una buena gestión integrada de aguas urbanas. Entre ellos se encuentran Buenos Aires (Argentina), Sao Paulo y Aracajú (Brasil), Bogotá y Medellín (Colombia), Tegucigalpa (Honduras), Monterrey (México) y Asunción (Paraguay) (BM, 2012). En Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo escribe una Guía de Diseño de Técnicas Alternativas para Soluciones de Agua de Lluvia en Sectores Urbanos en 1996, el cual se actualiza en 2005, y en 2013 la Dirección de Obras Hidráulicas crea el Manual de Drenaje Urbano (MINVU, 1996; MINVU, 2005; DOH, 2013). En Colombia, la ciudad de Bogotá por medio de la Secretaría de Ambiente Distrital propone la implementación de SDUS como solución para mitigar los efectos de inundaciones recurrentes en la ciudad y como parte del programa de Buenas Prácticas de Gestión (BGP) en el año 2011, se crea una “Guía De Manejo Ambiental Para El Sector De La Construcción” con el objetivo de proporcionar una herramienta técnica a la hora de implementar estos sistemas. (SDA, 2011; SDA, 2013).

Resulta importante recalcar que el uso en crecimiento de estos sistemas de drenaje urbano denota la necesidad de innovar para mejorar la calidad de vida de las personas, ya sea para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico o debido a la necesidad que conlleva el cambio climático.

Particularmente en Argentina, como se mencionó anteriormente, la ciudad de Buenos Aires se encontró en la lista de países seleccionados por el Banco Mundial. De esta manera, el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires implementa SDUS en la “Villa Olímpica” y en el Boulevard Roosevelt de la Comuna 5 con sistemas de infiltración. La información correspondiente con los detalles sobre el funcionamiento, beneficio y gestión de los sistemas empleados se encuentra en

el Manual de Diseño Urbano dentro de la categoría de Paisaje Urbano Verde (GCABA, 2015). Por otro lado, el Instituto Nacional del Agua (INA) trata el tema de Desarrollo Urbano de Bajo Impacto Hidrológico en la provincia de Mendoza, en el cual hacen mención de buenas prácticas ambientales por medio de SDUS (Burgos, 2007). El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) posee una guía de tipos de plantas que deben implementarse en techos verdes (Soto, *et al.* 2014) y manuales de implementación de cosecha de agua para aprovisionamiento en regiones áridas y rurales (INTA, 2013). Además, existen múltiples trabajos finales de grado y postgrado en diferentes universidades del país, como de Rio Negro, Buenos Aires, Córdoba, La Rioja, Misiones, entre otras, que tratan la importancia de la implementación de estos sistemas (eg. Benassi, 2012; Arregui Henk, 2016; Browne, 2015; Gomez Tournier, 2017; Rodriguez Sanchez, 2013).

1.1- Santa Rosa: situación local. Alcances de la tesina

La ciudad de Santa Rosa, capital provincial, se ubica al este de la provincia de La Pampa en el área de transición entre un clima subhúmedo seco y semiárido. Cuenta con una población de 103.241 habitantes según el censo del año 2010 y una tasa de crecimiento poblacional del 9% para el período 2001-2010 (INDEC, 2010). La población se abastece de agua de origen subterráneo del acuífero Toay-Santa Rosa-Anguila-Catriló y también superficial del Río Colorado, desde el año 2004, por medio de un acueducto con una extensión de más de 400 km. Por otro lado, el uso de bombeo domiciliario para consumo de agua ha disminuido debido a la distribución de agua potable (Tullio, *et al.* 2015; Balditarra, 2017; Camilletti, *et al.*, 2018). De esta manera, y sumado a una notable ampliación del área impermeabilizada, la falta de mantenimiento y subdimensionamiento de los sistemas de saneamiento, se produjo un aumento del nivel freático que ocasionaron varios inconvenientes en la ciudad. Estos factores han determinado que exista un incremento en la cantidad y magnitud de las inundaciones en la ciudad en respuesta a eventos de precipitación.

Por lo tanto, resulta pertinente analizar la situación hidrológica, considerar el crecimiento, el ordenamiento de la ciudad y la respuesta hídrica de la urbe ante la posibilidad de implementar sistemas de saneamiento sostenibles, que puedan resultar interesantes como una solución para las problemáticas de inundación y para el aprovechamiento de agua de lluvia. De esta manera, en

esta tesina se pretende integrar observaciones y modelación hidrológica-hidráulica para evaluar, particularmente, la respuesta hidrológica y el efecto de SDUS del tipo cosecha de agua de lluvia para la ciudad de Santa Rosa.

1.2- Objetivos

1.2.1 – Objetivo general

Evaluar la posibilidad de implementar un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible (SDUS) a partir de cosecha, retención, almacenamiento y uso de agua en una cuenca urbana.

1.2.2 – Objetivos específicos

- Evaluar la respuesta hidrológica de la ciudad en función de la entrada natural que constituyen las precipitaciones a través de la modelación hidrológica-hidráulica basada en el modelo SWMM.
- Evaluar los efectos de los SDUS basado en cosecha de agua que incluyan la retención, almacenamiento y uso del agua bajo distintos escenarios.
- Realizar el ajuste un balance hidrológico para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

2. Materiales y Métodos

En este capítulo se procede a comentar las características del área de estudio en general, así como las subcuencas en particular utilizadas para la modelación hidrológica-hidráulica. Por otro lado, se desarrolla la descripción de los procedimientos metodológicos utilizados en esta tesina para el cumplimiento de los objetivos planteados.

2.1- Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Santa Rosa ($36^{\circ}37'13''S$ $64^{\circ}17'26''O$), departamento Capital, provincia de La Pampa, Argentina. La misma se subdivide en 62 barrios (Figura 1) y, según el censo del año 2010, cuenta con una población de 103.241 habitantes con una tasa de crecimiento poblacional del 9% para el período 2001-2010 (INDEC, 2010) y una población estimada para el departamento Capital de 118.669 habitantes para el año 2019 (INDEC, 2019).

Se encuentra circundada por campos de producción agropecuaria y próxima a dos cuencos, la Laguna Don Tomas y el Bajo Giuliani. En la Figura 1, se puede observar la Laguna Don Tomás en color oscuro en el mapa. Se detallará más sobre estos cuencos en la sección “Hidrología Superficial” de este capítulo.

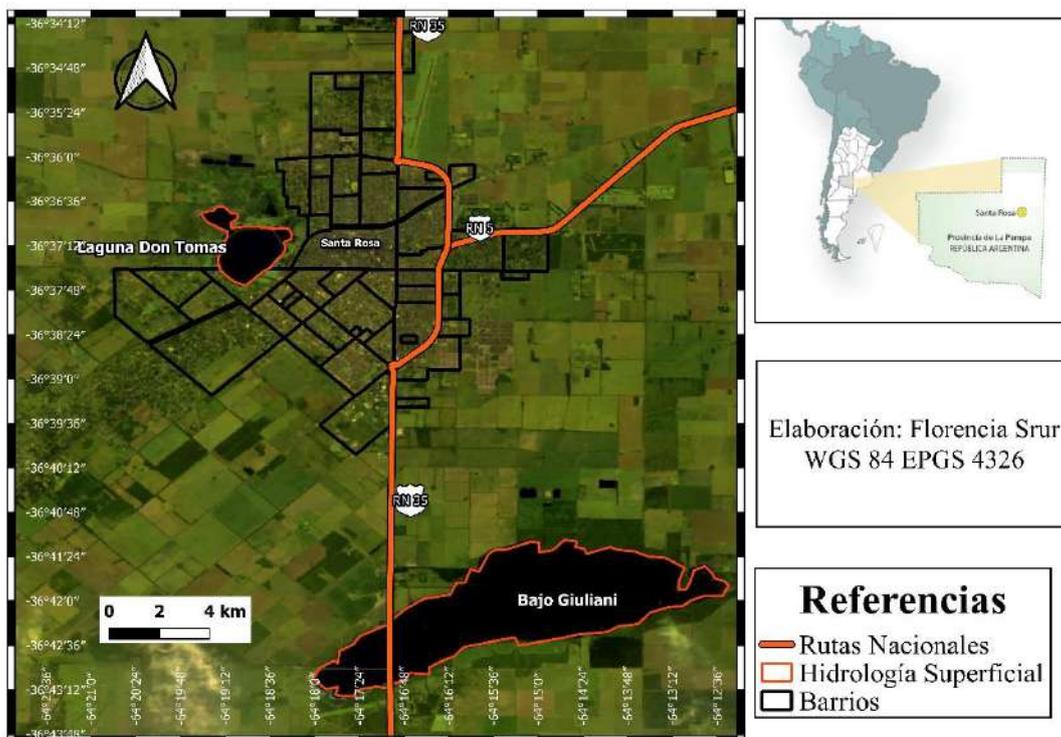


Figura 1. Mapa de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa

2.1.1.- Clima.

La ciudad de Santa Rosa se encuentra ubicada en un área de transición entre un ambiente subhúmedo seco y semiárido o subhúmedo (Casagrande, 1982). Presenta un clima continental con estaciones bien definidas diferenciándose invierno de verano. Además, posee un patrón de precipitaciones marcado con mayores valores en primavera y otoño y menores en invierno (Figura 2).

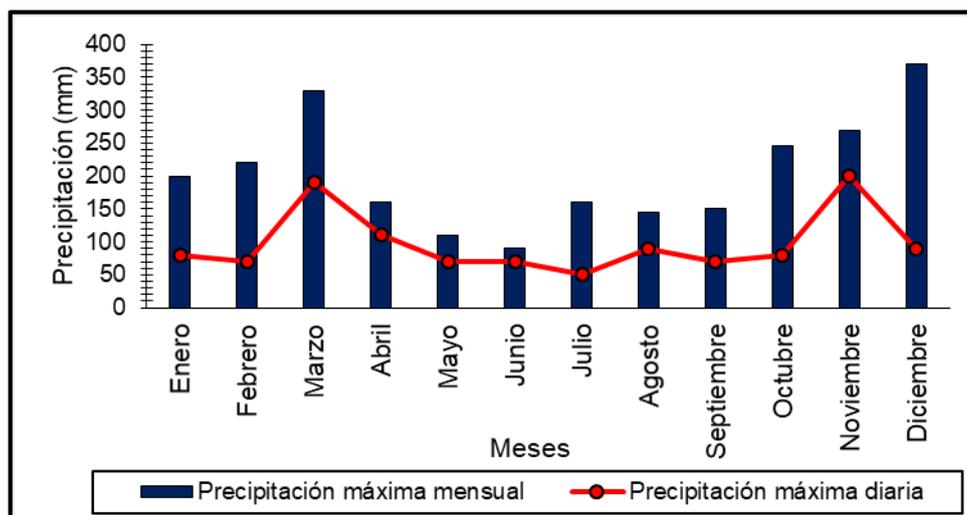


Figura 2. Precipitaciones extremas diarias y mensuales de Santa Rosa para el período 1961-2018 (SMN, 2019)

Según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la ciudad se encuentra situada entre las isoietas de los 600 y 800 mm. (Figura 3). El módulo de precipitación para el período 1921 a 2011 es de 639,9 mm, siendo la mínima precipitación anual de 274,5 mm para el año 1937 y la máxima precipitación anual de 1150,1 mm para el año 2010 (APA, 2012).

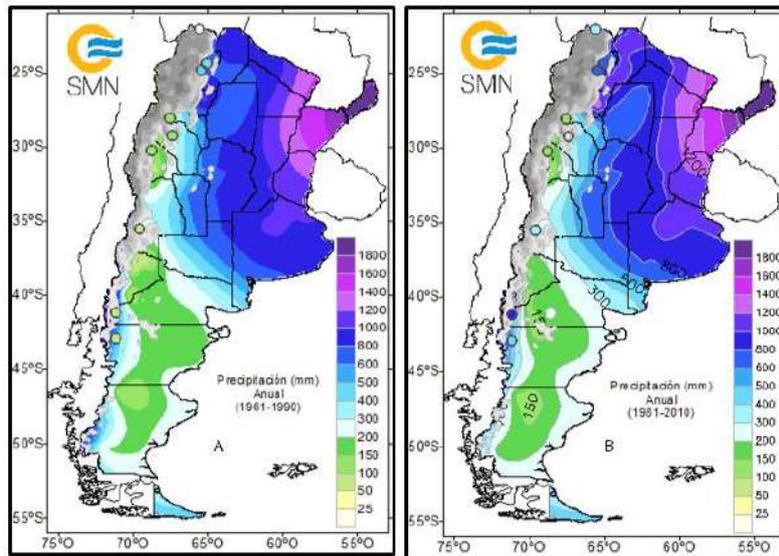


Figura 3. Mapa de isohietas de Argentina (A) período 1961-1990 (A) y (B) período 1981-2010 (B) (SMN, 2019)

La frecuencia de precipitación calculada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el departamento Capital, en el período 1961-1990 se encuentra entre las isolinneas 70 días y 80 días (Figura 4).

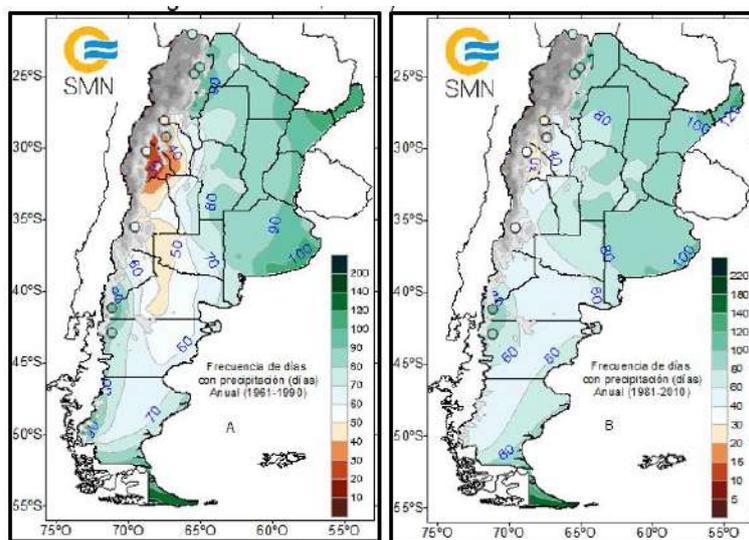


Figura 4. Frecuencia de días con precipitación de Argentina (A) período 1961-1990 y (B) período 1981-2010 (SMN, 2019)

Según el SMN, la temperatura media oscila entre los 8°C en el mes más frío y los 25°C en el mes más caluroso, siendo la temperatura media anual, para el período 1981-2010 de 15,46°C, con una humedad relativa que ronda el 65,8% para dicho intervalo (Figura 5). El viento posee una velocidad que oscila entre

los 10 y 15 km/hs con direcciones predominantes N-NE y S-SW (Cano, 1980). La evapotranspiración media anual para la ciudad, calculada por medio del método FAO Penman-Monteith, resulta en 1240,2 mm para el período 1961-2009, con un valor máximo de 1550,1 mm y un mínimo de 1070,5 mm, con un desvío estándar de 114,6 mm (García, 2017). Es decir, que el balance hídrico medio anual de la ciudad posee un carácter deficitario.

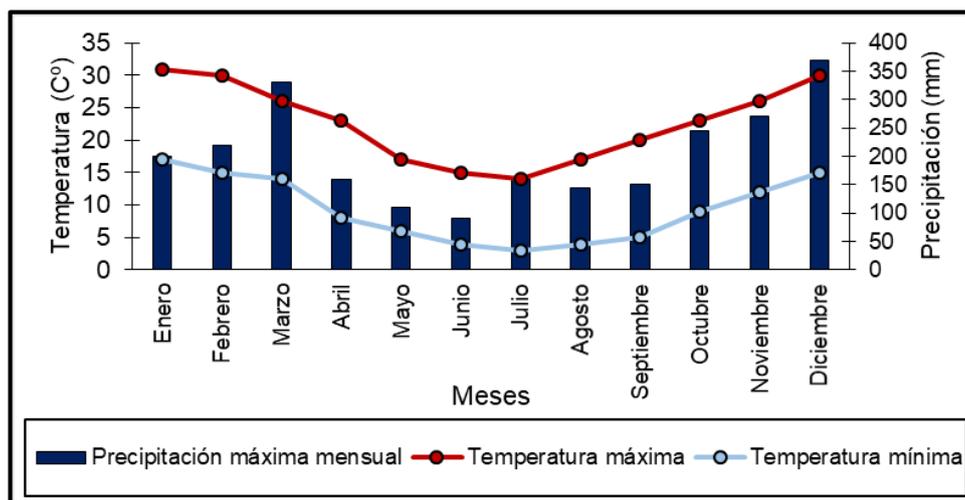


Figura 5. Climograma de Santa Rosa, La Pampa, para el período 1981-2010. (SMN, 2019)

2.1.2.- Hidrología Superficial.

Como se mencionó anteriormente, la ciudad de Santa Rosa se encuentra próxima a dos cuencos salinos, la Laguna Don Tomas y el Bajo Giuliani (Figura 6). La primera, se encuentra ubicada al oeste de la ciudad, es de carácter endorreico y afluente de las aguas subterráneas, donde las variaciones de nivel están estrechamente ligadas al régimen de precipitación (Balditarra, 2017) y al consecuente aporte pluvial de la zona urbana. Estos aportes provienen de un sistema de drenaje pluvial, que recolectan y transportan el agua de lluvia de la ciudad de manera subterránea hacia la laguna. Los excedentes que no logran ingresar al sistema escurren por las calles y avenidas de la ciudad, de esta manera, el agua llega al cuenco urbano por medio de tres canales abiertos (Figura 7) (Cavallie, 1979; EIH S.A., 1986; Tullio, *et al.* 2015).

La Laguna Don Tomás tiene la capacidad máxima para recibir aportes en una cota de hasta 167,918 m, lo que equivale a 2,35m de la escala limnimétrica ubicada bajo el puente levadizo del predio del Parque Recreativo Don Tomás

(Grimaux, 1986). Se debe considerar de todas maneras, que la estructura de la laguna se ha modificado por su carácter de parque recreativo, por lo que ha aumentado la impermeabilización por la construcción de caminos asfaltados, casas, centros culturales, islas artificiales, entre otros, que cambiaron la respuesta hidrológica del cuenco.

Por otro lado, el Bajo Giuliani, es una geodepresión endorreica que se encuentra ubicado al sureste de la ciudad. Con una extensión, registrada en el año 2017, de 1200 ha y una profundidad máxima de 6 m (Pratts, *et al.* 2018). Las entradas de este sistema consisten en aportes naturales, por precipitación y subterráneos (Mecca, 2008), y aportes antrópicos. Estos últimos, provienen de aguas grises tratadas en las plantas de tratamiento Norte y Sur (Figura 6), de los pluviales del sur este de la urbe y de los trasvasados por medio de una bomba desde la Laguna Don Tomás, en los casos de trasvasamiento por exceso de nivel en el pelo de agua.

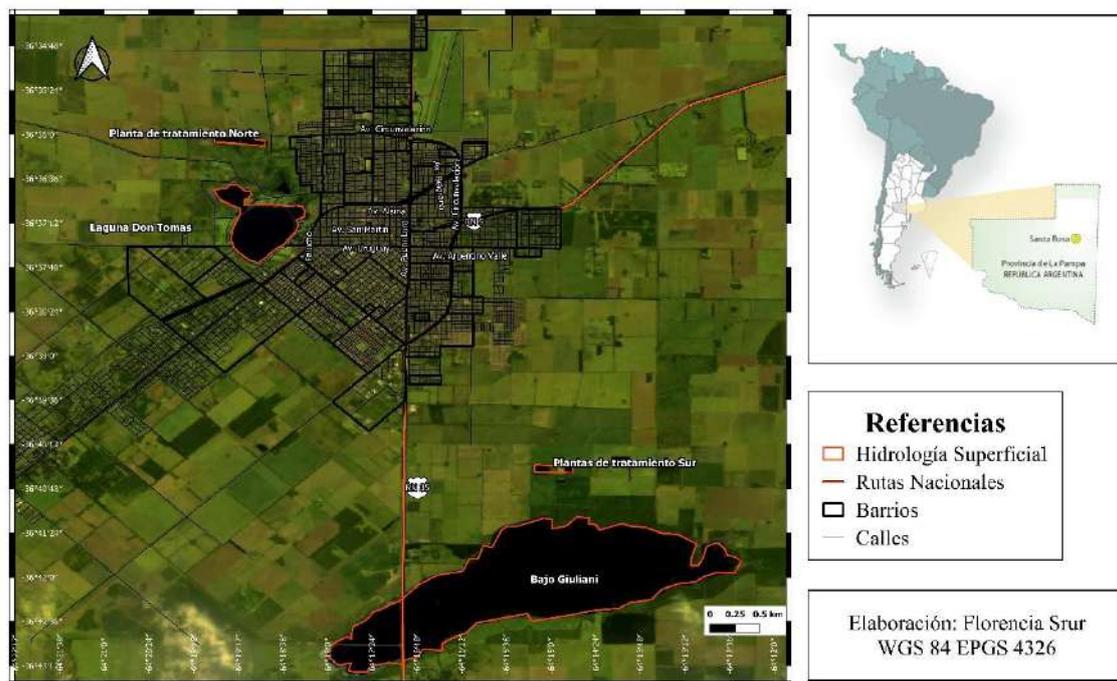


Figura 6. Ubicación geográfica de Laguna Don Tomás, Bajo Giuliani y plantas de tratamiento Norte y Sur, La Pampa.



Figura 7. Canales a cielo abierto que recolectan, para transportar a la Laguna Don Tomás, excesos de precipitación que no logran ser captados por Sistema Menor. Canal ubicado en el final de calle Sarmiento (A) y en el final de la Avenida San Martín Oeste (B).

2.1.3.- Hidrología subterránea.

La ciudad se encuentra conformada sobre un acuífero libre, con varias lentes con calidad de potable para consumo humano, discontinuas entre sí y con un ancho medio de 10 km denominadas “acuífero Toay-Santa Rosa-Anguila-Catriló”, (Figura 8) (Giai y Tullio, 1998). Según el Inventario de Recursos Hídricos de la provincia (2015) el agua del acuífero se encuentra dentro de la categorización “aguas con condiciones favorables para el abastecimiento público”, sin embargo, en la ciudad de Santa Rosa, la calidad de la misma se vio desmejorada por el aumento de la salinidad a causa de la sobre explotación y por efecto de la contaminación por restos orgánicos (Tullio, *et al.* 2015).

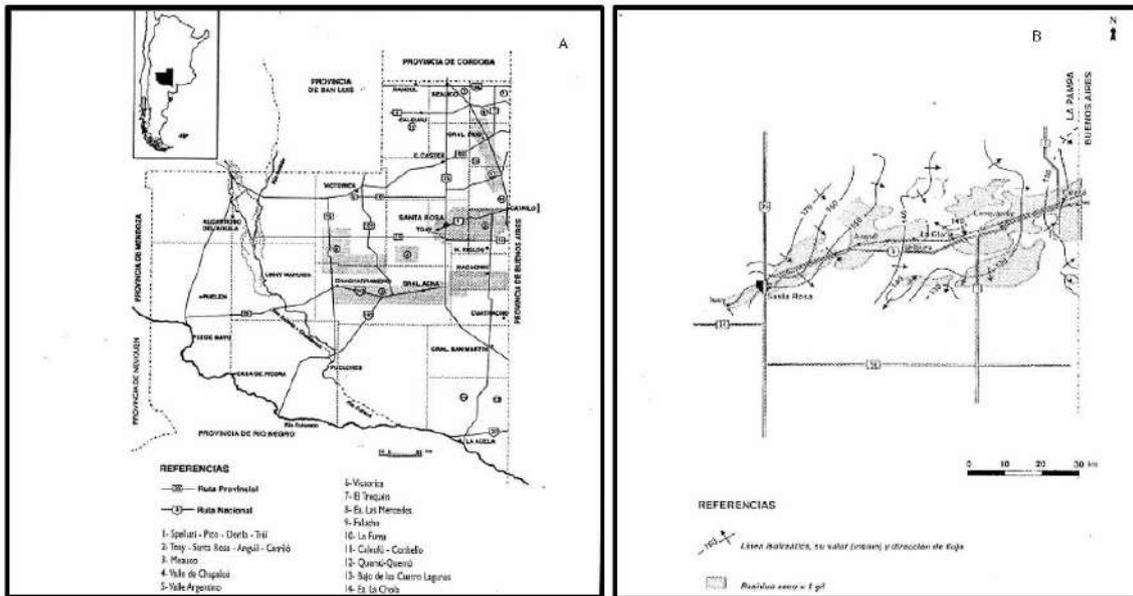


Figura 8. Acuíferos de la provincia de La Pampa (A) y acuífero Toay-Santa Rosa-Aguil-Catrilo (B) (Giai y Tullio 1998)

Por otro lado, existe una interacción entre el agua subterránea y el cuenco urbano Don Tomás, siendo el carácter de la laguna efluente (Figura 9). Esto se puede observar en épocas secas cuando el cuenco posee agua pese a tener un comportamiento altamente regulado por las precipitaciones y trasvasamientos (Tullio, *et al.* 2015; Balditarra, 2017). Los niveles freáticos de la ciudad han ascendido en las últimas décadas hasta llegar a niveles históricos previos a la explotación del acuífero debido a la merma en la explotación de este recurso *in situ* (Tullio, *et al.*, 2015). Esto tuvo connotaciones negativas como el anegamiento de los subsuelos de edificios, los cuales fueron construidos basándose en los niveles del acuífero en el momento de su explotación y menor nivel freático.

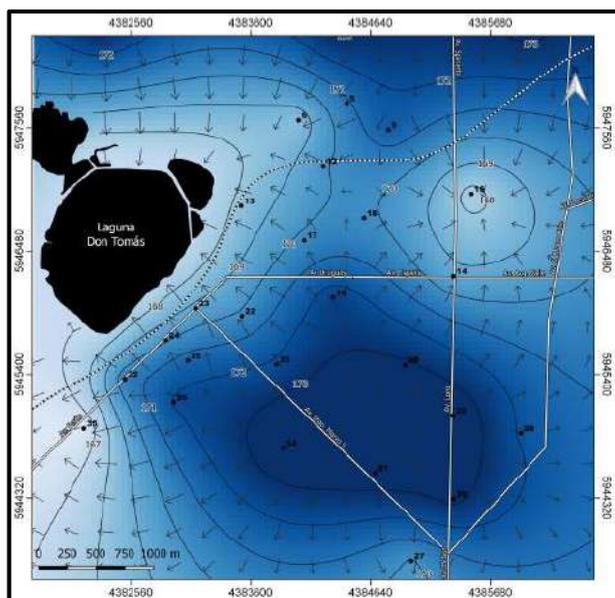


Figura 9. . Mapa de isopiezas (msnm) y red de flujo para el mes de julio de 2017. (Tullio, *et al* 2015)

2.1.4- Saneamiento urbano: gestión pluvial, cloacas y agua potable.

La ciudad de Santa Rosa cuenta con servicios de agua potable, cloacas y desagües pluviales en la mayoría de sus barrios. El sistema de cloacas de la ciudad se construyó en el año 1942 con cañerías de asbesto de 150 mm de diámetro y hormigón de 300 mm (Figura 10 y 11). Los líquidos cloacales son tratados en las plantas de tratamiento Norte y Sur y luego son derivados a la laguna Bajo Giuliani (Figura 10). Según el último censo poblacional, el 88,36% de la población de Santa Rosa posee conexión al sistema de cloacas (INDEC, 2010). El sistema de saneamiento sufre de roturas y derrames debido a la antigüedad de los caños e incremento del volumen de agua servida como consecuencia del aumento de construcciones edilicias, por esta razón, se realizan permanentemente cambios puntuales de cañerías por caños de PVC de 160 y 400 mm (Figura 10) (APA, 2009; DAGSA, 2018). A raíz del colapso estructural de este sistema que afecta la salud de las personas por contaminación superficial y de los reservorios naturales como la laguna Don Tomás, la ciudad se encuentra en Emergencia Sanitaria según Ley Provincial N° 2915/16.

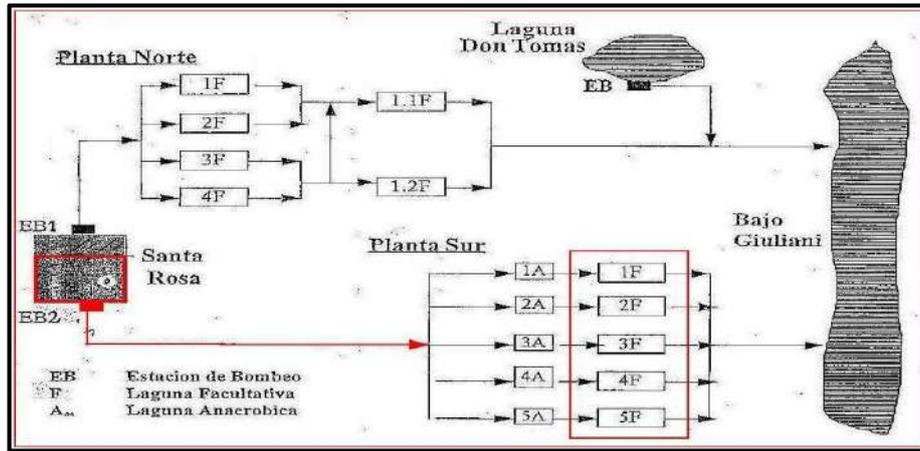


Figura 10. Esquema del sistema de cloacas realizado por la Dirección de Hidráulica de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (Polanco, 2013).

En Santa Rosa, el agua potable es prestada como servicio desde el año 1927, inicialmente por Obras Sanitarias de la Nación (O.S.N.), servicio entregado al gobierno provincial, quien desde 2003 cedió su manejo a la Municipalidad, en la actualidad por la Dirección de Agua y Saneamiento (DAGSA). La red consiste en cañerías de PVC de 75, 100 y 200 mm de diámetro. El servicio aprovisiona al 95% de la población (APA) y el 5% restante se abastece mediante perforaciones domiciliarias. El suministro proviene de dos acueductos, uno transporta aguas desde el Río Colorado y otro, agua subterránea del acuífero Santa Rosa-Anguill-Uriburu.

El acueducto del Río Colorado es una obra de ingeniería que se completó en el año 2005, transporta un caudal teórico diario de $\approx 2400 \text{ m}^3/\text{h}$ y real de no más de $950 \text{ m}^3/\text{h}$, desde la planta de toma y potabilización, ubicada a 360 km de la ciudad de Santa Rosa, en la localidad de Pichi Mahuida (Figura 11 y 12).

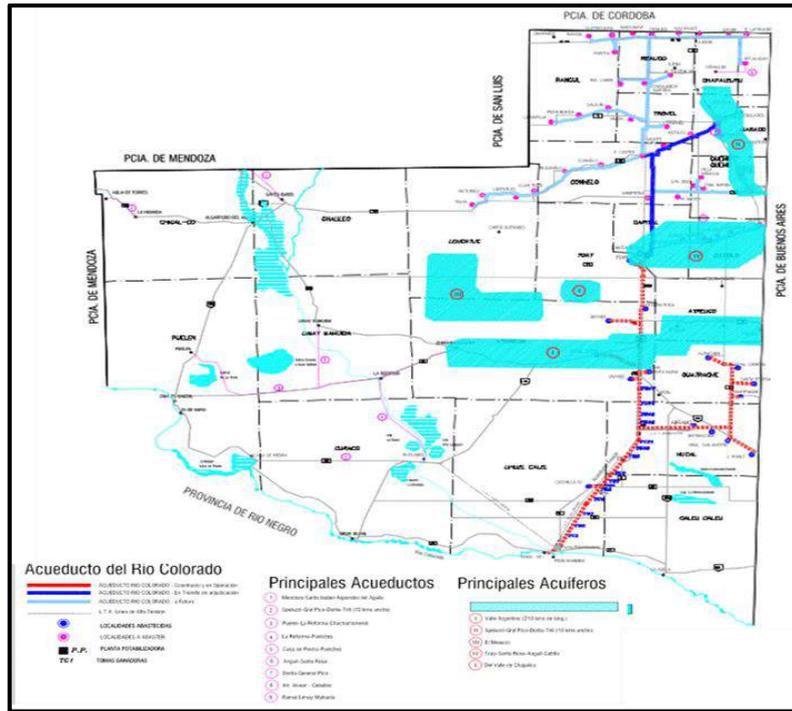


Figura 11. Acueducto Río Colorado, localidades abastecidas y plantas de tratamiento (APA).

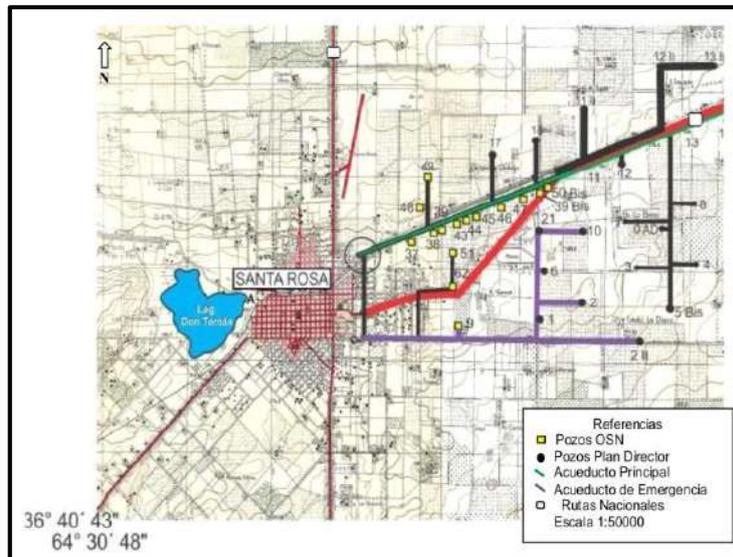


Figura 12. Croquis de perforaciones realizadas por APA y OSN fuera del eje urbano de la ciudad de Santa Rosa. (Tullio, *et al.* 2015)

Por otro lado, el incremento de la impermeabilización de la ciudad a partir del año 1952, con la pavimentación de las primeras calles, con el consecuente cambio en el uso del suelo, conllevó un crecimiento en la magnitud de la escorrentía superficial, mientras que, la construcción de las redes pluviales comenzó en la década de 1980 (Cuello, *et al.* 1998). Actualmente, la red consiste

en un sistema convencional dual, es decir, que los efluentes cloacales y pluviales son transportados por diferentes cañerías (Figura 13).

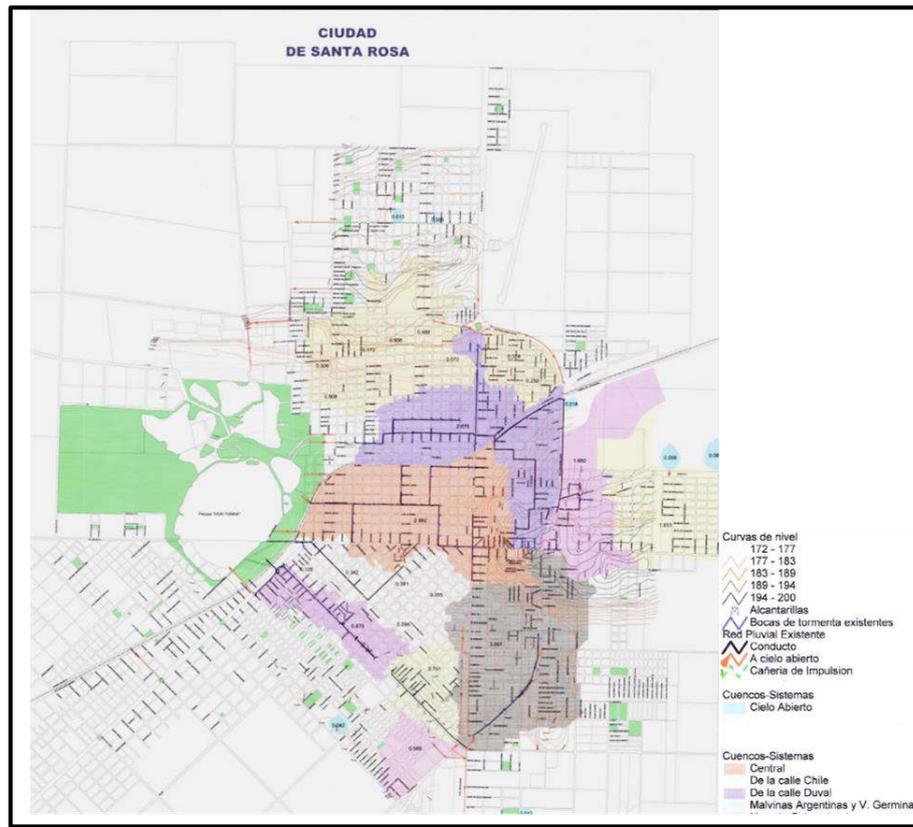


Figura 13. Plano de cuencas y red pluvial de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa (MSR, 2017).

2.1.5.- Criterios para la priorización y selección de cuencas para modelación hidrológica-hidráulica.

Se seleccionaron dos áreas de interés dentro la ciudad de Santa Rosa para poder realizar la modelación con el modelo hidrológico-hidráulico SWMM y evaluar la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible por medio de cosecha de agua en la ciudad (Figura 14). Por un lado, se definió una subcuenca en un sector del barrio “Villa Elvina” y por otro el barrio “Centro”. La cuenca “Villa Elvina” (SV) tiene una superficie de 18 ha aproximadamente, con lo cual es una cuenca urbana pequeña en la ciudad. Por su topografía, no recibe aportes externos de otros barrios aledaños y tiene una sola salida que se ubica en un vertedero sobre la Av. Arturo Illia. Estas características le confieren una respuesta similar a la de una cuenca cerrada, razón por la cual fue seleccionada para realizar los análisis de sensibilidad, calibración y validación de parámetros, requeridos para la correcta modelación hidrológica-hidráulica.

Por otro lado, se seleccionó la cuenca “Centro” (SC) el cual comprende el barrio Centro con una superficie aproximada de 200 ha. Es el casco céntrico de la capital pampeana, presenta el más alto nivel de impermeabilización de la ciudad y la mayor densidad de edificaciones públicas y privadas, así como también un gran movimiento de personas por cuestiones comerciales, bancarias y administrativas.

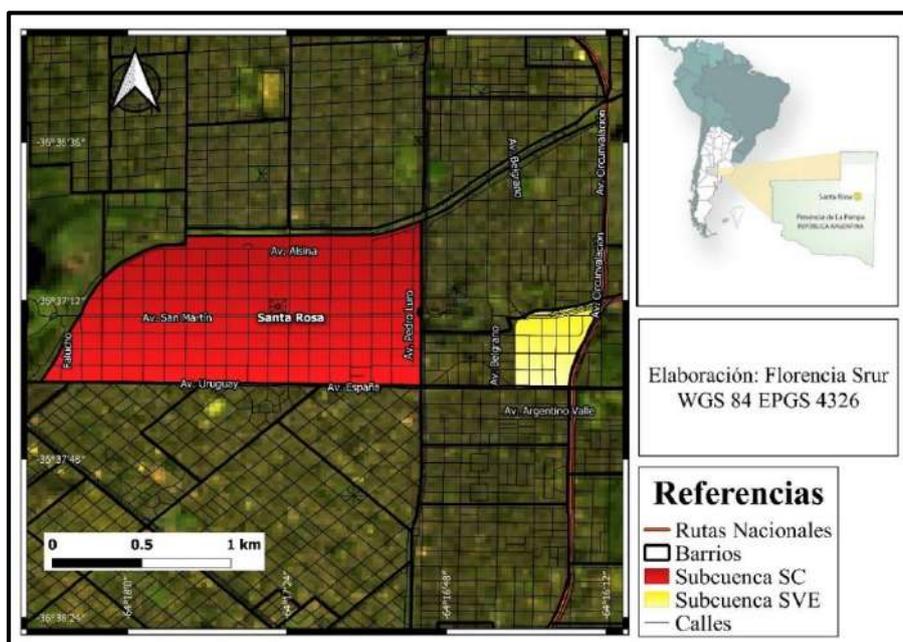


Figura 14. Localización de subcuencas Centro (SC delimitado en color rojo) y Villa Elvina (SV delimitado en color amarillo) en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

2.2- Modelación Hidrológica-Hidráulica SWMM

Se realizó la modelación hidrológica-hidráulica para reproducir la dinámica de los procesos de transformación lluvia-escorrentía con el modelo de la Asociación de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), *Storm Water Management Model* (SWMM) en su versión de software libre 5.1. Se trata de un modelo matemático distribuido que simula la respuesta de una cuenca a partir de registros pluviométricos y parámetros físicos y numéricos. De esta manera, conceptualiza diversos procesos dentro del dominio del balance hídrico a modo de compartimentos o módulos (Figura 15):

- *Módulo Atmosférico*. Analiza la precipitación y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo. El objeto que utiliza este módulo para representar las entradas por precipitación se llama “pluviómetro”.
- *Módulo de Superficie del Suelo*. Se representa por medio de uno o más objetos “subcuenca”. Estos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico y genera flujos de salida. Estos pueden ser en forma de infiltración, escorrentía superficial o evaporación.
- *Módulo de Aguas Subterráneas*. Recibe la infiltración del Módulo Superficie del Suelo y transfiere una parte como flujo de entrada al Módulo de Transporte.
- *Módulo de Transporte*. Se trata de una red de elementos de transporte u objetos, como conductos, canales, tuberías, bombas y elementos de regulación; unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el fluido hacia los Nodos de Vertido los cuales constituyen las salidas del sistema.

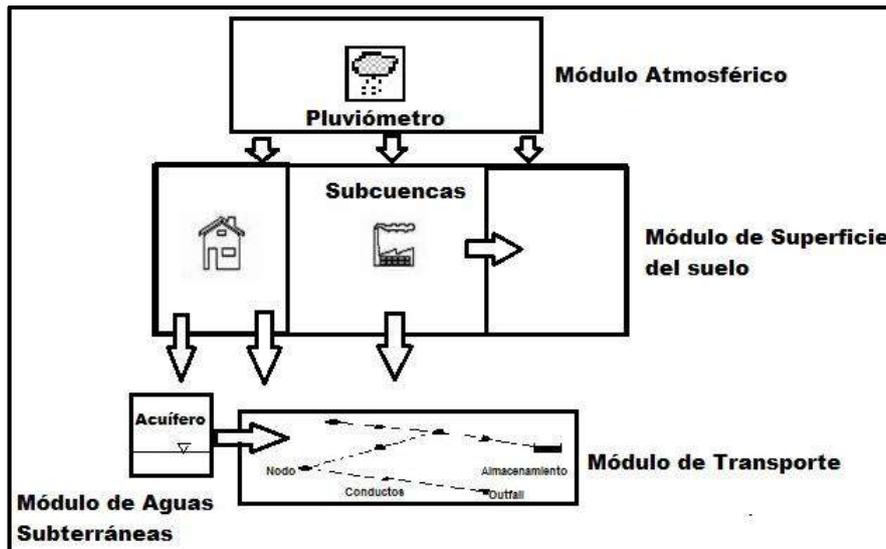


Figura 15. Modelo conceptual del sistema de drenaje urbano organizados como módulos en SWMM (Adaptado de Concha Jopia, 2007)

Cada módulo se caracteriza por poseer componentes visuales que representan los elementos del sistema real en la simulación. En la Tabla 1, se describen y detallan las componentes o elementos visuales utilizados en esta tesina, así como también los parámetros de cada uno.

Tabla 1. Descripción de componentes visuales y detalle de sus parámetros en SWMM.

OBJETOS DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETROS
Subcuenca	<p>Unidades hidrológicas de terreno en los cuales la topografía y los elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente a un punto de descarga.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • % impermeabilidad • N de Manning para áreas permeables e impermeables • Almacenamiento en depresión • % de suelo impermeable sin almacenamiento en depresión
Conducto	<p>Tuberías o canales por donde se desplaza el agua desde un nodo a otro del sistema de transporte.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •N de Manning
Vertedero (Sumidero o Weir)	<p>Se utilizan para modelar descargas y estructuras de separación del flujo en sistemas de drenaje, representan las bocas de tormenta o sumideros los cuales conectan el Sistema Mayor con el Sistema Menor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Coeficiente de descarga para la sección central del vertedero
Nodos	<p>Se tratan de objetos adimensionales que proporcionan el dato de cota para la dirección del flujo.</p>	
Nodos de descarga (Vertedero)	<p>Es el nodo de salida de sistema. Se encuentra aguas abajo en el final de la cuenca, tanto para los Sistemas Mayores y Menores.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Condición de borde de la descarga
LID o SDUS	<p>Son propiedades que se le asignan a las subcuencas. En el caso de las cisternas, son contenedores que recogen el escurrimiento del techo o cualquier superficie donde impacte directamente el agua de lluvia durante las tormentas y brindan la opción de poder liberar o reutilizar el agua.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de LID • Área de captación • Volumen de la cisterna • % de área impermeable captado • % de área permeable captado

Dentro de los componentes no visuales, se encuentran las ecuaciones que gobiernan la modelación hidrológica-hidráulica, las secciones transversales y las series temporales.

Partiendo de las ecuaciones que corresponden a las componentes no visuales, el modelo utiliza las ecuaciones de continuidad (Ecuación 1) y *momentum* (Ecuación 2) de Saint-Venant en su forma completa para el tránsito de los hidrogramas, es decir, que cumple con las siguientes suposiciones (Chow, *et al.* 2000):

- El flujo es unidimensional.
- El flujo varía gradualmente a lo largo del canal.
- El eje longitudinal del canal es aproximadamente una línea recta.
- La pendiente del fondo del canal es pequeña y el lecho fijo.
- Las ecuaciones de Manning (Ecuación 3) pueden utilizarse para describir los efectos de resistencia.
- El fluido es incomprensible y de densidad constante a lo largo del flujo.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 1. Ecuación de continuidad}$$

donde $\partial Q/\partial x$ es la tasa de cambio de flujo en el canal con respecto a la distancia y $\partial A/\partial t$ es la tasa de cambio de la masa almacenada dentro del volumen de control.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad \text{Ecuación 2. Ecuación de } momentum$$

donde $1/A \cdot \partial Q/\partial t$ es el término de aceleración local, $1/A \cdot \partial/\partial x(Q^2/A)$ es el término de aceleración convectiva, $g \cdot \partial y/\partial x$ es el término de fuerza de presión, g es el término de fuerza gravitacional y $(S_0 - S_f)$ es el término de fuerza de fricción (Chow, *et al.* 2000).

$$V(h) = \frac{1}{n} R(h)^{2/3} \sqrt{S} \quad \text{Ecuación 3. Ecuación de Manning}$$

donde $C = \sqrt{R(h) * S}$ es el coeficiente de Chézy, siendo R(h) el radio hidráulico, n es un parámetro que depende de la rugosidad, V(h) es a velocidad media del agua en m/s y S es la pendiente de fondo del canal en m/m (Chow, *et al.* 2000).

SWMM contempla los efectos de almacenamiento en los conductos, resaltos hidráulicos, flujo reverso y presurizado. Esto último es importante para evaluar el comportamiento tipo de la inundación en los objetos del modelo. Además, este modelo de transporte puede aplicarse en cualquier configuración de red (Rossman, 2009). En este trabajo, se utilizó un modelo de transporte de Onda Dinámica, el cual resuelve las ecuaciones completas de Saint Venant (Ecuación 1 y Ecuación 2), por tanto genera resultados más precisos.

Por otro lado, el modelo utilizado para simular abstracciones fue el propuesto por *Soil Conservation Service* (1972) denominado Número de curva o CN:

$$CN = \frac{1000}{10+S}$$

Ecuación 4. Número de curva

donde S es la retención potencial máxima del suelo.

Dependiendo el tipo textural del suelo, su capacidad de drenaje y el uso o cobertura del mismo, los valores de CN se encuentran tabulados en un rango del 0 al 100, siendo 100 un suelo totalmente impermeable. Los suelos se encuentran dentro de cuatro categorías, **A** suelos con mucha profundidad, buen drenaje y de textura arenosa; **B** suelos de menor drenaje que A con texturas francas; **C** suelos de lento drenaje con texturas de suelos francas pero con gran porcentaje de arcillas y **D** suelos de muy lento drenaje con texturas mayormente arcillosas.

Para el caso particular de la ciudad de Santa Rosa, los suelos se caracterizan como suelo tipo **B**, es decir, franco gruesa mixta con drenaje excesivo (Caviglia, *et al.*, 2010), se optaron por números de curva correspondientes a la categoría de suelo B. En la Tabla 2 se describen los usos del suelo y su correspondiente CN.

Tabla 2. Valores de número de curva (CN) para suelos de tipo B bajo distintos usos.

DESCRIPCIÓN DEL USO DE SUELO	CN PARA SUELO TIPO B
Espacios abiertos	69
Zonas comerciales	92
Zonas residenciales	75
Aparcamientos pavimentados	98
Calles y carreteras	98

Siguiendo con las componentes no visuales, las secciones transversales representan objetos de 3 dimensiones como cortes en 2 dimensiones. De esta manera, se puede observar cómo varía la cota de fondo del conducto en función de la distancia a lo largo de la sección longitudinal. En esta tesina, los conductos fueron utilizados para representar calles, los cuales se les asignó una forma irregular y una sección transversal a partir de observaciones a campo.

Por otro lado, SWMM representa conceptualmente la escorrentía superficial considerando que cada cuenca se trata de un depósito no lineal cuyo balance considera como entradas a la precipitación y/o a los caudales provenientes de otras cuencas y como salida, la infiltración, evaporación y escorrentía superficial. La salida por escorrentía se produce únicamente cuando la profundidad del agua en la cuenca excede el valor máximo de almacenamiento en depresión (Figura 16) (Rossman, 2015).

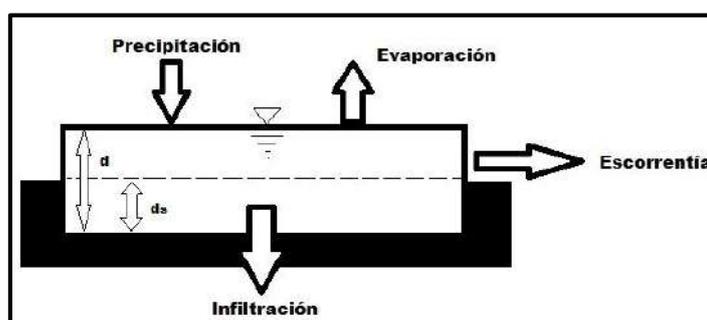


Figura 16. Modelo conceptual teórico de escorrentía superficial en SWMM (Rossman, 2005).

Para el objetivo específico de realizar un balance hídrico en la ciudad de Santa Rosa, se procedió a analizar las funciones de entrada y salida del sistema urbano. De esta manera, se conceptualizaron los parámetros de la función del balance en un modelo conceptual para entender el comportamiento de la ciudad y realizar luego la modelación hidrológica-hidráulica.

Por último, para la entrada al sistema por precipitaciones se contó con una serie de datos diarios (1951-2018). Estas fueron clasificadas y analizadas por medio de la determinación de los tiempos de recurrencia a partir de dos metodologías diferentes. Los datos pluviométricos diarios para el período 1951-1984 son del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para 1984-2011 son de la Administración Provincial del Agua (APA) y para 2011-2018 son de la Cooperativa Popular de Electricidad de Santa Rosa (CPE). De esta manera, se contrastaron estas metodologías enriqueciendo el análisis de las precipitaciones para la ciudad de Santa Rosa.

En síntesis, se puede resumir la estrategia de modelación de la siguiente manera (Figura 17):

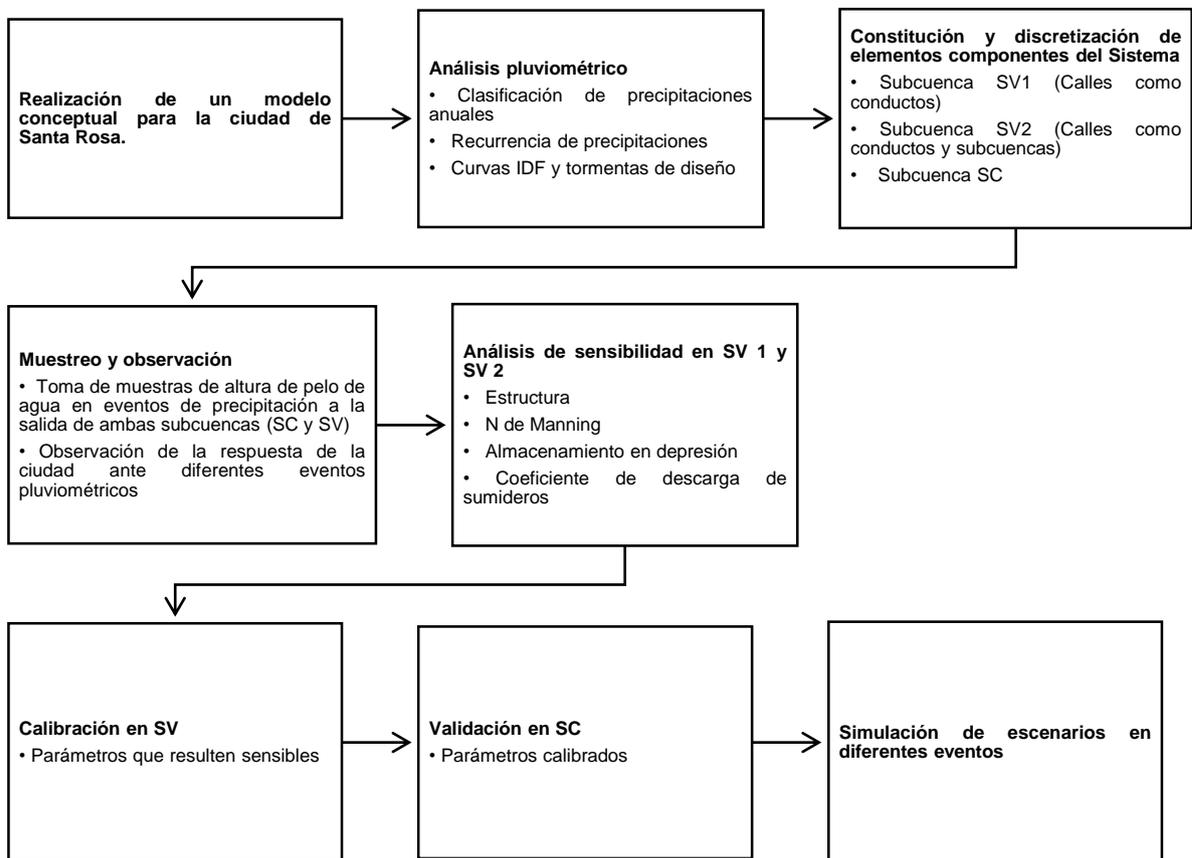


Figura 17. Estrategia para la modelación de dos subcuencas urbanas en SWMM 5.1.

2.2.1.- Análisis pluviométrico.

Con el fin de poder clasificar las precipitaciones en la ciudad de Santa Rosa, se recolectaron datos pluviométricos diarios de tres fuentes para el período 1951-2018. Debido a que la red de pluviómetros es poco densa, se recopilieron registros de las estaciones disponibles (Linsley, *et al.* 1977). De esta manera, como se mencionó anteriormente, para el período 1951-1984 los datos son del SMN, para el período 1985-2011 son de APA y para el período 2012-2018 son de la CPE. Estos últimos son el resultado de agregar datos horarios del registro de la estación meteorológica automática que se encuentra en el predio de la CPE.

2.2.1.1.- Clasificación de precipitaciones anuales.

Se totalizaron de manera anual las precipitaciones diarias, luego se ordenaron de mayor a menor los datos pluviométricos anuales en una planilla de cálculo. Debido a que las precipitaciones acumuladas anuales tienden a tener una distribución normal (Linsley, *et al.* 1977), se procedió a clasificar la serie de datos en cinco percentiles para caracterizar los tipos de años de la ciudad de Santa Rosa. De esta forma, las precipitaciones para el período 1951-2018 se categorizaron y se le asignó a cada uno un color correspondiente de la siguiente manera:

- Quintil menor al 20% y color rojo: años “muy secos”
- Quintil entre 20-40% y color amarillo: años “secos”,
- Quintil entre 40-60% y color verde: años “normales”
- Quintil entre 60-80% y color azul: años “húmedos”
- Quintil entre 80-100% y color violeta: años “muy húmedos”.

2.2.1.2.- Recurrencia de precipitaciones y curvas I.D.F.

El concepto de tiempo de recurrencia o de retorno, asume que la probabilidad de que ocurra cierto tipo de precipitación siempre va a estar asociada a un intervalo de tiempo específico (Chow, *et al.* 2000). Para esto se calcularon las probabilidades de máximas precipitaciones diarias para cada año por medio de la regla de Laplace (Ecuación 5).

$$Probabilidad (A) = \frac{N \text{ casos favorables}}{N \text{ casos posibles}}$$

Ecuación 5. Regla de Laplace

Una vez obtenidas las probabilidades, los tiempos de recurrencia para cada precipitación se obtuvieron de la siguiente manera:

$$Tr = \frac{ni}{N}$$

Ecuación 6. Tiempo de recurrencia

donde Tr es el tiempo de recurrencia en años, n_i es la posición de la precipitación máxima diaria en el ranking del orden de mayor a menor y N es la cantidad total de años de registros.

Debido a que con esta metodología el tiempo de recurrencia está sujeto a la cantidad de registros diarios que se posee, se exploró la creación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I.D.F.) por medio de regresión potencial múltiple para crear tormentas de diseño con períodos de retorno superiores al período de los registros pluviométricos con los que se dispuso.

Las curvas I.D.F. son curvas características para cada lugar que se obtienen al unir puntos representativos de intensidad en intervalos de diferente duración y que corresponden a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978 y 1987). Solo se pueden obtener de manera directa si se cuenta con registros de pluviógrafo, aunque, también pueden obtenerse a partir de precipitaciones máximas en 24 horas.

Primero, se seleccionaron las precipitaciones máximas en 24 horas para el período 1951-2018. Luego, se trataron estos registros con la distribución de probabilidad de Gumbel (Gumbel, 1954; Apacio Mijares, 1992, 1992; Chow, *et al.* 2000), la cual supone que se tienen **N** muestras, cada una de las cuales contiene **n** eventos; si se selecciona el máximo **x** de los **n** eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que **n** aumenta, la función de distribución de probabilidad de **x** tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Ecuación 7. Función de distribución de probabilidad

donde la función de probabilidad será entonces:

$$f(x) = \alpha e^{(-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)})}$$

Ecuación 8. Función de probabilidad

donde los parámetros de la función α y β se estiman de acuerdo a:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S$$

Ecuación 9. *alfa*

$$\beta = \bar{x} - 0,5403\alpha$$

Ecuación 10. *beta*

con:

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

Ecuación 11. *S*

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Ecuación 12. \bar{x}

Pese a que la metodología empleada utiliza esta distribución de probabilidad, se evaluó si es adecuado utilizar la distribución de Gumbel con los datos de precipitación disponibles mediante el uso del software libre de procesamiento estadístico hidrológico de la Universidad Nacional Técnica de Atenas Hydrognomon 4.1® (Kozanis, *et al.* 2005 ; Kozanis, *et al.* 2010; Garba, *et al.* 2012).

A continuación, se realizó el cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias en base a:

$$YT = Ln Ln \frac{T}{T-1}$$

Ecuación 13. Variable reducida YT

$$XT'' = \beta + \alpha YT$$

Ecuación 14. Precipitación XT''

donde YT es la variable reducida y XT'' es la precipitación en milímetros.

Para mejorar la precisión en la determinación del valor de precipitación máxima diaria con períodos de retorno a un valor verdadero (Sau Soto, 1996) se debe realizar una corrección al valor XT'' . Weiss (1964) propuso una corrección por intervalo fijo de observación luego de realizar un estudio estadístico. En este, encontró que los resultados de un análisis probabilístico de las máximas anuales tomados en un intervalo fijo y único (24 horas), al ser incrementadas en un 13%

tendían a magnitudes más próximas a las observadas. Esta corrección se define como la relación entre la precipitación máxima anual de intervalo verdadero y el intervalo máximo anual de precipitación fija. La razón de esto radica en que a medida que los datos de lluvia se proporcionan como un intervalo fijo de, por ejemplo 1 hora, es poco probable que el intervalo verdadero de 1 hora para la precipitación máxima esté acorde con el intervalo fijo de 1 hora para toda precipitación que ocurra en cualquier período de retorno. De esta manera, las precipitaciones pueden asumirse que siguen una distribución uniforme. (Yu, *et al.* 2015) Este coeficiente es independiente del lugar y del período de retorno de las precipitaciones, tiene un valor de 1.13.

$$\text{Precipitación con corrección por intervalo fijo} = 1,13 \times XT'' \quad \text{Ecuación 15.}$$

Corrección por intervalo fijo

Seguidamente, se calcularon las precipitaciones máximas (P_d) para diferentes tiempos de duración de lluvias; y después se determinaron las Intensidades de lluvia a partir de P_d (Ecuación 16). Para esto, se emplearon coeficientes para las relaciones de lluvia de duración de 24 horas (Tabla 3), según duración de precipitación y frecuencia de las precipitaciones.

$$I \left(\frac{mm}{hs} \right) = \frac{P_d (mm)}{t_{duración}(hs)} \quad \text{Ecuación 16. Intensidad de precipitación}$$

Tabla 3. Coeficientes para las relaciones de lluvia con duración de 24 horas.

DURACIÓN EN HORAS									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
COEFICIENTES									
0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Una vez obtenidos los datos de intensidad máxima, se prosiguió a realizar las curvas I.D.F. para períodos de retornos de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años según la siguiente representación matemática (Apacio Mijares, 1992, 1992; Chow, *et al.* 2000):

$$I = \frac{K.T^m}{t^n}$$

Ecuación 17. Intensidad máxima de precipitación

Donde I es la intensidad medida en mm/hs, T es el período de retorno en años, t es la duración de la precipitación en milímetros y, K, m y n son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple. Tomándose los logaritmos de la ecuación 13:

$$\log i = \log k + m \log T - n \log t$$

Ecuación 18. Logaritmo de *i*

lo cual es equivalente a:

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

Ecuación 19. Y

Donde:

$$Y = \log(I), X_2 = \log(D), a_1 = m$$

Ecuación 20. Y

$$X_1 = \log(T), a_0 = \log(K), a_2 = n$$

Ecuación 21. X₁

Reemplazando en la ecuación 15 se obtiene:

$$d = K.T^m$$

Ecuación 22. *d*

Por lo tanto:

$$I = \frac{d}{t^n} = d.t^{-n}$$

Ecuación 23. Intensidad de precipitación

Finalmente, se obtuvo una Tabla de Intensidades de lluvia en función a la Duración y sus respectivos Períodos de Retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años) para así graficar las Curvas I.D.F. de lluvias para la ciudad Santa Rosa, La Pampa.

2.2.1.3.- Tormentas de diseño.

Se define Tormenta de Diseño a un patrón de precipitación definido que se utiliza en el diseño de un sistema hidrológico y sirven, entre otras funciones, para determinar caudales picos en alcantarillados de aguas de lluvia (Chow, *et al.* 2000). Para este trabajo, se realizaron tormentas de diseño, a partir de las curvas I.D.F. construidas, por medio del Método de Bloque Alterno. El hietograma de diseño creado de esta manera, especifica la precipitación en altura de lámina que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total.

Se seleccionó el período de retorno de diseño y su correspondiente se obtuvo multiplicando la intensidad y la duración obtenidas de las curvas IDF. Después, se calculó la diferencia entre valores sucesivos de precipitación para encontrar la cantidad de lluvia (mm) que debe sumarse por cada unidad adicional de tiempo. Por último, se ordenaron estos bloques en secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y los demás incrementos se asignaron de manera alternativa hacia la derecha e izquierda del bloque central para darle forma al hietograma de diseño (Chow, *et al.* 2000).

2.2.2.- Constitución y discretización de elementos componentes del sistema.

Se constituyeron tres subcuencas en el marco de esta tesis, dos de las cuales corresponden a la misma área geográfica. Estas recibieron el nombre de Subcuenca Centro (SC) y Subcuenca Villa Elvina 1 y 2 (SV1; SV2) (Ver Figura 14). La primera subcuenca fue elegida debido a tratarse del área comercial y bancario de la capital de la provincia que presenta el mayor grado de impermeabilización de la ciudad, la mayor densidad de edificaciones públicas y privadas. La segunda y tercera subcuencas, es decir SV1 y SV2, corresponden a una porción del barrio Villa Elvina, la cual es una cuenca pequeña y que debido a sus características topográficas y su circunscripción, asemeja a una cuenca cerrada, por lo tanto, es ideal para realizar los análisis de sensibilidad de parámetros y calibración del modelo. Las cuatro avenidas que bordean la zona constituyen la condición de borde de la subcuenca.

Se constituyó la subcuenca SV1 con calles como conductos y SV2 con calles como conductos y como subcuencas con el fin de evaluar la sensibilidad

del modelo en función de la estructura. La diferencia entre ambas radica en cómo se representaron los componentes reales del sistema con respecto a los objetos de la estructura del modelo (Figura 18). Se parametrizaron su % de ocupación en proporción al área de las manzanas, su almacenamiento en depresión, número de curva, % de impermeabilidad y almacenamiento en depresión y el N de Manning. (Tabla 3). Mientras tanto, SC se constituyó a partir de la estructura que mejor representó la realidad según los resultados del análisis de sensibilidad a la estructura, realizado con la comparación en la respuesta hidrológica entre SV1 y SV2.

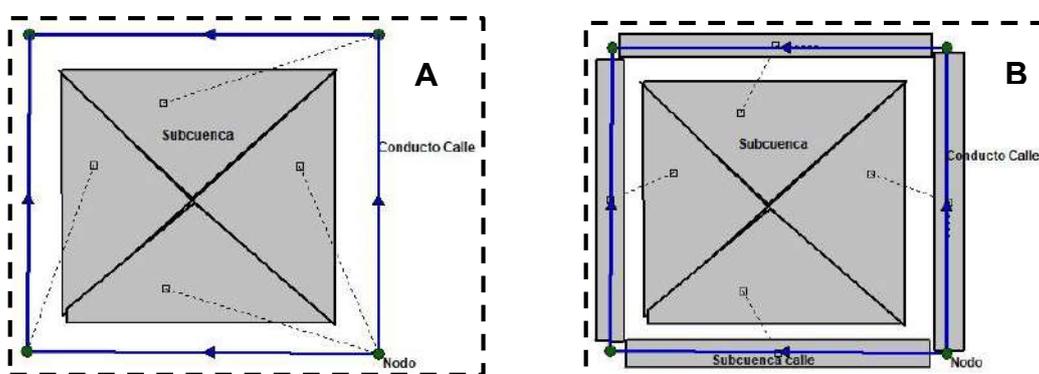


Figura 18. Esquema del modelo SWMM 5.1 en manzanas. A) Calles como conductos. B) Calles como subcuencas y conductos.

En todas las cuencas urbanas establecidas, cada manzana está representada por cuatro “subcuencas” tributarias que descargan en el nodo más alto, es decir con mayor cota, de su perímetro. En los casos necesarios de ser representados por otra condición, se subdividieron las manzanas en más “subcuencas” tributarias. La cota de los nodos y la pendiente de las subcuencas y conductos se obtuvo mediante el procesamiento, con el *software* Global Mapper® en su versión 19, de un modelo digital de elevación (DEM) elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a partir de un relevamiento aerofotográfico de 5x5m de resolución espacial para la ciudad de Santa Rosa.

La conexión entre el sistema mayor, es decir las calles que transportan escorrentía superficial, y el sistema menor, es decir los desagües pluviales, se realizaron por medio de Vertederos (Sumideros) los cuales representan bocas de tormenta. Estos objetos, poseen como único parámetro el “coeficiente de

descarga”, el cual se trata de la capacidad de interceptión que posee el sumidero (Linsley, *et al.* 1977):

$$C_w = \frac{Q_i}{L * d^{1.5}} \quad \text{Ecuación 24. Coeficiente de descarga de sumideros}$$

donde C_w es el coeficiente de descarga, Q_i es el caudal de ingreso al sumidero, L es la longitud de abertura y d es la altura de la coladera medida desde la base hasta la altura libre de agua. Este parámetro fue calibrado.

Por último, en todos los escenarios, el flujo final de las cuencas urbanas se constituyó por medio de “vertederos” (*Outfall*). En el caso de las calles constituidas como “conducto” (Figuras 19 A), el aporte de las “subcuencas” de las manzanas va hacia los “nodos” y es transportado por los “conductos” en dirección a la pendiente. Por otro lado, en el escenario con las calles constituidas como “subcuencas” y “conductos”, las “subcuencas” de las manzanas aportan a las subcuencas de las calles, las cuales luego conducen el flujo a los “nodos” y es transportado por los “conductos” (Figuras 19 B).

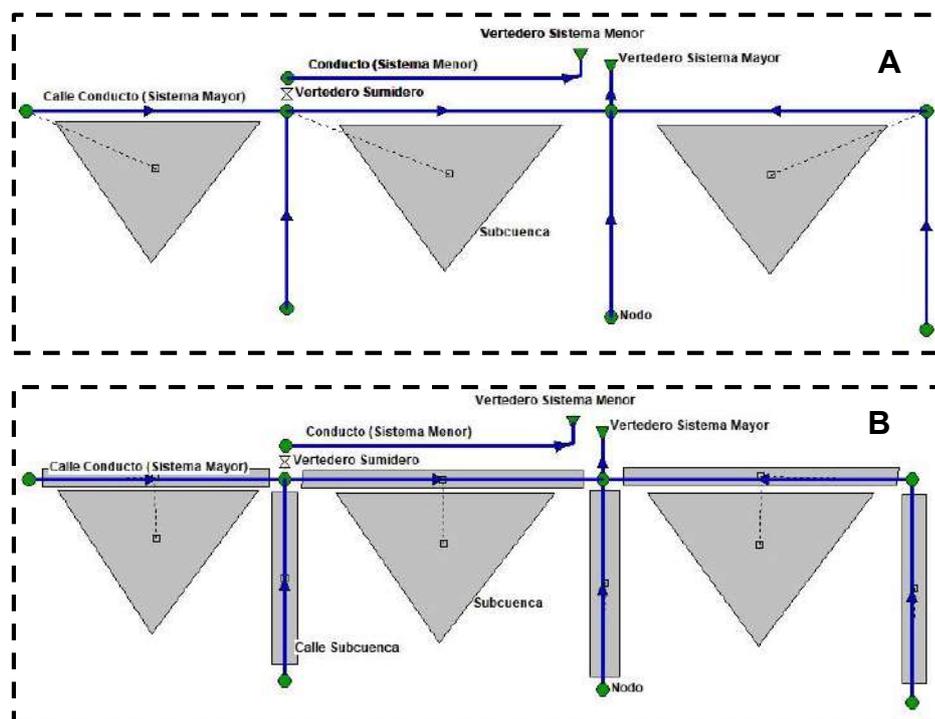


Figura 19. Esquema del modelo SWMM 5.1 en las salidas del Sistema. Se representan calles como conductos (A) y calles como subcuencas y conductos (B).

La cantidad de objetos de la estructura del modelo utilizados para cada área de interés se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de objetos de la estructura del modelo utilizado para cada subcuenca estudiada.

OBJETOS DEL MODELO					
	Subcuenca	Conducto	Nodo	Vertedero (Outfall)	Sumidero (Weir)
SUBCUENCA	CANTIDAD				
SV1	66	54	38	2	10
SV2	108	54	38	2	10
SC	858	361	221	3	57

2.2.3.- Muestreo de datos y observación a campo.

Para poder realizar los análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo se tomaron medidas de las alturas de pelo de agua, producto de la escorrentía en calles, en ambas cuencas a la salida de las mismas en diferentes eventos de precipitación durante los años 2018 y 2019.

Debido a que en el año 2018 se registró una precipitación anual de 468 mm, la cantidad de datos reales fueron escasos, sin embargo suficientes para poder calibrar y validar satisfactoriamente el modelo hidrológico-hidráulico. Las observaciones y mediciones en las subcuencas SV1 y SV2 se registraron en el vertedero de salida de la cuenca (Figura 20), mientras que, en la SC se tomaron al final de la Avenida San Martín Oeste porque se consideró que esta es la principal salida del sistema (Figura 21). Para las mediciones se utilizó una regla cortada en el cero. En cada evento, se registraron datos en intervalos de cinco, diez y treinta minutos dependiendo de las intensidades de las precipitaciones muestreadas.



Figura 20. Final de subcuencas y punto de muestreo en SV1 y SV2. Vertedero al final de calle Las Heras en Barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa.



Figura 21. Punto de muestreo para validación de SC. Acceso a Laguna Don Tomás por Avenida San Martín Oeste, Santa Rosa, La Pampa.

2.2.4.- Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico-hidráulico.

La Figura 22 muestra el esquema de procedimiento para el análisis de sensibilidad, calibración y modelación en SWMM aplicadas en el área de estudio.

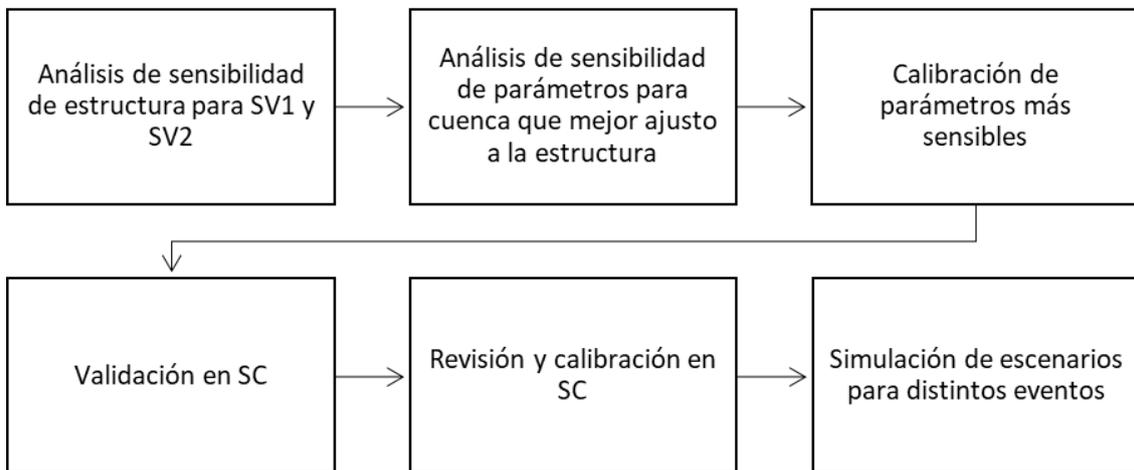


Figura 22. Esquema de procedimiento para análisis de sensibilidad, calibración y modelación en SWMM de las áreas de estudio.

Como parte de las pruebas iniciales del modelo, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de las variaciones en simulación de varios parámetros, en torno a valores tabulados, con respecto a registros observados en las cuencas SV1 y SV2.

El primer análisis que se efectuó fue la representación de la heterogeneidad espacial mediante los componentes del modelo que constituyen la estructura del modelo. Para esto, se constituyeron dos subcuencas cuya única diferencia radica en si el transporte de escorrentía se hace desde las parcelas hacia conductos que representaron las calles o, si la escorrentía de las parcelas va hacia subcuencas que representan calles, las cuales también generan escorrentía hacia un conducto. De esta manera, SV1 representa la cuenca con

menor complejidad mientras que SV2 considera la generación de escorrentía, además de su conducción (Figura 19 A y B).

Luego, se seleccionó la subcuenca cuya estructura mejor ajustó con respecto a los valores observados y se analizaron los parámetros de N Manning para las subcuencas y los conductos; almacenamiento en depresión, y coeficiente de descarga de los sumideros a partir de rangos (Tabla 5) tomados de valores tabulados (ASCE, 1982 y McCuen, *et al.* 1996 en Rossman, 2005).

Tabla 5. Detalle y rangos de valores utilizados para evaluar la sensibilidad de los parámetros del modelo SWMM en las subcuencas SV1 y SV2.

PARÁMETRO	RANGO/DETALLE
Estructura del modelo	SV1: Calles representadas como conductos abiertos SV2: Calles representadas como subcuencas y conductos abiertos
N Manning permeable (Subcuenca)	0,05-0,41
N Manning impermeable (Subcuenca)	0,011-0,024
N Manning (Conductos)	0,013-0,040
Almacenamiento en depresión (mm)	1,25-5
Coficiente de descarga (Sumideros)	1,38-2,1

Seguidamente, se realizó la calibración manual de los parámetros que resultaron sensibles en los rangos establecidos con respecto a los valores muestreados, considerando siempre que un error de continuidad $\leq 10\%$ es aceptable, caso contrario, se revisó todo el modelo nuevamente (Concha Jopia, 2007).

Por último, los valores calibrados para los parámetros fueron utilizados en la constitución del modelo de la subcuenca principal SC, sobre la que se realizó la validación con registros observados.

2.2.5.- Evaluación de respuesta hidrológica.

Una vez parametrizada la cuenca SC se procedió a evaluar la respuesta hidrológica de la ciudad ante diferentes tormentas de diseño de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de tiempo de recurrencia. Se compararon los hidrogramas de escorrentía superficial de las tres salidas del sistema por las calles Sarmiento, Avenidas Uruguay y San Martín Oeste. Así como también se relacionaron los tiempos al pico y volúmenes de salida a partir de los caudales.

2.2.6.- Planteamiento de escenarios para cuenca SC.

Finalmente se plantearon ocho escenarios para simular y poder comparar la situación actual de la ciudad de Santa Rosa con la posibilidad de implementar SDUS por medio de cosecha de agua, que se categorizaron con números y colores (Tabla 6).

Tabla 6. Escenarios planteados para la modelación hidrológica con código de color y número.

Escenario	Número y colorimetría	Figura
Sin SDUS (Situación actual del sistema)	1 – Naranja	
Con cisternas en edificios existentes	2 – Amarillo	Figura 23 A
Con cisternas en espacios verdes	3 – Verde	Figura 23 B
Con cisternas en edificios futuros en construcción	4 – Azul	Figura 23 C
Con cisternas en edificios existentes y espacios verdes	5 – Rosa	Figura 23 D
Con cisternas en edificios futuros en construcción y espacios verdes	6 – Violeta	Figura 23 E
Con cisternas en edificios existentes y futuros en construcción	7 – Gris	Figura 23 F
Con cisternas en edificios existentes, futuros en construcción y espacios verdes	8 – Rojo	Figura 23 G

Aunque los espacios verdes no constituyen un problema en la generación de escorrentía, sus áreas impermeables suponen una superficie de captación de agua a considerar para almacenar y usar. Se consideraron solo los espacios verdes “Plaza San Martín” y “Parque Oliver” debido a su mayor extensión y porcentaje de área impermeable.

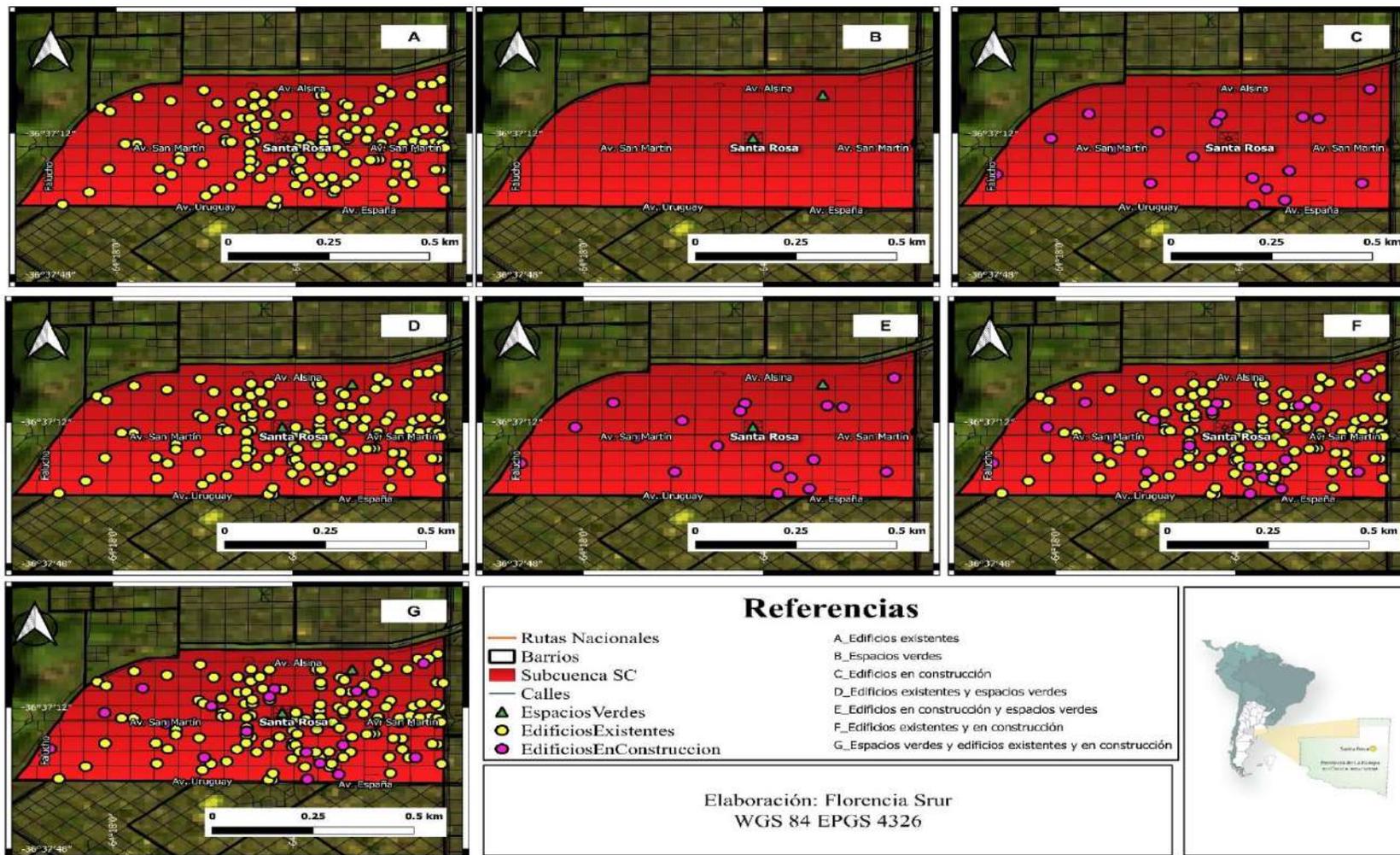


Figura 23. Mapa de escenarios con (A) edificios existentes, (B) espacios verdes y (C) en construcción localizados en el área de interés, Santa Rosa, La Pampa. (D), (E), (F) y (G) representan la combinación de los anteriores.

Cada escenario se simuló en 6 eventos diferentes que corresponden a las tormentas de diseño para los tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años con una hora de duración.

Se estimó el volumen total de las estructuras cisternas en los edificios en función de la demostración de Moura, *et al.* (2007) presentado en el manual de “Captación y almacenamiento de agua de lluvia” de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (F.A.O.):

dado que

$$AC = \frac{VT}{(C * Pm)} \quad \text{Ecuación 25. Área de captación}$$

donde AC el área de captación (m^2), C el coeficiente de esorrentía, Pm la precipitación media anual (mm) y VT el volumen de la estructura (l).

Entonces

$$VT = AC * C * Pm \quad \text{Ecuación 26. Volumen total de cisternas}$$

AC se estandarizó en función del promedio de las medidas de área del techo de los edificios construidos en la ciudad de Santa Rosa hasta el año 2018. El coeficiente de esorrentía se obtuvo de los valores calculados para la ciudad de Santa Rosa (Ingeniería Hidráulica S.C., 1993) estandarizados para áreas urbanas (Tabla 7) y la precipitación media anual utilizada fue la calculada en el análisis pluviométrico de esta tesina. De esta manera, las dimensiones de las cisternas se calcularon según:

$$VT = h * 2\pi r^2 \quad \text{Ecuación 27. Volumen de cilindro}$$

Siendo h la altura de la cisterna y r el radio de la misma.

Luego, se calculó el porcentaje de área de cada cisterna en función del área de las subcuencas donde se establecieron las mismas.

Tabla 7. Coeficientes de escorrentía (C) para diferentes tipos de superficies urbanas calculados para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

SUPERFICIE	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)
Calle o vereda	0,75
Estructuras con techos impermeables	0,70

Para los espacios verdes, los volúmenes de cisterna se evaluaron en función del área de captación correspondiente a los espacios impermeabilizados de las dos plazas consideradas.

2.3.-Balance Hídrico

Se comparó la variación de almacenamiento del sistema en un balance hídrico para los escenarios y eventos que resultaron con mayor impacto para el comportamiento de la ciudad a partir de los resultados de la modelación numérica y de los supuestos del modelo conceptual constituido.

3. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y su análisis tras aplicar las metodologías presentadas en el capítulo anterior. De esta manera, primero se presentan los correspondientes al análisis pluviométrico con la clasificación de precipitaciones y la construcción de tormentas de diseño bajo dos procedimientos para la ciudad de Santa Rosa. Luego, se presentan todos los resultados que se enmarcan dentro de la modelación hidrológica-hidráulica con el modelo SWMM, es decir, los análisis de sensibilidad, calibración, validación y evaluación de escenarios en diferentes eventos correspondientes a las tormentas de diseño.

3.1- Modelación Hidrológica-Hidráulica SWMM

3.1.2.- Modelo conceptual.

Se constituyó un modelo conceptual completo del balance hidrológico para la ciudad de Santa Rosa y se lo simplificó acorde a los objetivos de la tesina, teniendo en cuenta la disponibilidad de datos y el comportamiento del sistema (Ver Ecuaciones 28 y 29). Se consideraron, para el modelo completo, como entradas al sistema urbano la precipitación y los caudales provenientes de los acueductos de Río Colorado y acuífero Anguil y como salidas, los caudales que son transportados por los sistemas mayor y menor de la ciudad, el caudal de cloacas y las pérdidas que se pudieran llegar producir en el sistema de transporte de agua potable. Los receptores de las salidas son la Laguna Don Tomás, para los provenientes del desagüe pluvial, la escorrentía superficial y las pérdidas, y el Bajo Giuliani para los efluentes cloacales tratados y también escorrentía superficial (Figura 24).

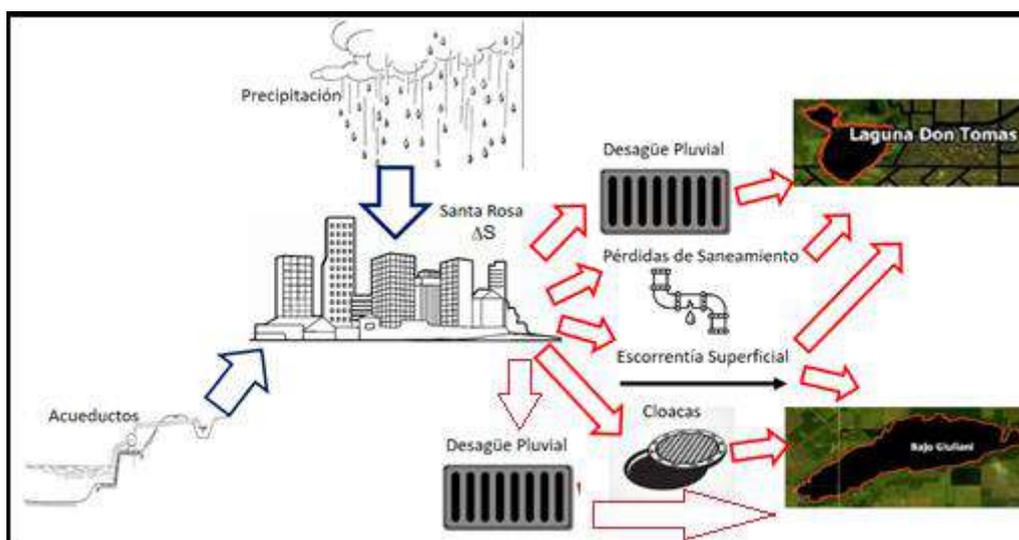


Figura 24. Modelo conceptual de balance hídrico para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

La Ecuación 28 describe la función del balance hídrico completo que quedó definida de la siguiente manera:

$$\Delta S = (PP + Q_{Acueductos}) - (Q_{sistema\ mayor\ pluvial} + Q_{sistema\ menor\ pluvial} + Q_{cloacas} + Q_{perdidas})$$

Ecuación 28. Balance hídrico

donde ΔS es la variación de almacenamiento superficial de la cuenca urbana, PP es la precipitación diaria en el área, $Q_{Acueductos}$ es el caudal diario de agua del Río Colorado y del acuífero en la localidad de Anguil, $Q_{sistema\ mayor\ pluvial}$ es el caudal que ingresa a la Laguna Don Tomás por los desagües pluviales, $Q_{sistema\ menor\ pluvial}$ es la escorrentía superficial que va tanto a la laguna como al bajo, $Q_{cloacas}$ es el caudal de agua tratada que va al bajo Giuliani y $Q_{perdidas}$ es el caudal de agua proveniente de las pérdidas en las obras de saneamiento de la ciudad. Debido a que no se contó con datos cuantitativos del caudal de las pérdidas que puede haber en el sistema de saneamiento, se consideró que toda el agua que proviene de los acueductos, se transforma en caudal de aguas grises tratadas y derivada al cuenco Bajo Giuliani.

En la ecuación 29 se describe el balance hídrico conceptual simplificado de agua superficial para la ciudad de Santa Rosa queda dado por:

$$\Delta S = (PP) - (Q_{sistema\ mayor\ pluvial} + Q_{sistema\ menor\ pluvial}) \quad \text{Ecuación} \quad 29.$$

Balance hídrico simplificado

Es decir, que la variación de almacenamiento de agua superficial en la ciudad se ve alterado por la relación entre las precipitaciones y los caudales de los sistemas mayor y menor del desagüe pluvial.

3.1.3.- Análisis pluviométrico. Clasificación de precipitaciones anuales.

Los valores de precipitación anual correspondientes a la clasificación realizada por medio de determinación de quintiles (serie 1951-2018 de SMN, APA y CPE) se muestran en la Tabla 8. De esta manera, los años muy secos (quintil del 0 al 20%) poseen valores de precipitación anual menores o iguales a 437,47mm; los años secos (quintil del 20 al 40%) se enmarcan en el rango de precipitaciones anuales entre los 437,48 y los 562,71 mm; los años normales (quintil del 40 al 60%) entre 562,72 y 683,35 mm anuales; los años clasificados como húmedos (quintil del 60 al 80%) tienen precipitaciones anuales que se

encuentran entre los 683,36 y los 748,54 mm; por último, los años clasificados como muy húmedos se tratan de todos los años cuyo registro supere los 748,55mm de precipitación anual.

Tabla 8. Intervalos porcentuales de quintiles de precipitación (mm) para la clasificación pluviométrica de años “Muy secos”, “secos”, “normal”, “húmedo” y “muy húmedo”.

QUINTILES				
0-20% (Muy seco)	20-40% (seco)	40-60% (normal)	60-80% (húmedo)	80-100% (muy húmedo)
< 437,47	437,48 - 526,71	526,52 - 683,65	683,66 - 784,54	> 784,55

De acuerdo a las clases determinadas por quintiles, se presentan la clasificación correspondiente para cada año de la serie analizada (Tabla 9).

Tabla 9. Clasificación pluviométrica de serie 1951-2018 para Santa Rosa, La Pampa.

MUY SECO	SECO	NORMAL	HÚMEDO	MUY HÚMEDO
1959	1951	1966	1972	1957
1962	1952	1967	1973	1963
1965	1953	1969	1975	1976
1995	1954	1970	1979	1985
2003	1958	1978	1984	1986
2005	1960	1980	1987	1991
2009	1961	1983	1994	1992
	1964	1988	1997	1996
	1971	1990	2000	1999
	1974	1998	2002	2001
	1981	2006	2004	2014
	2008	2007	2010	2016
	2013	2012	2015	2017
	2018			

Al observar la serie 1951-2018 de precipitaciones anual para la ciudad de Santa Rosa, se aprecia que presenta un comportamiento periódico entre temporadas secas y húmedas. En consecuencia, las mayores precipitaciones se encuentran dentro de las categorías “seco” y “muy húmedo”. Por otro lado, este proceso no cuenta con una relación o predictibilidad apreciable a simple vista. (Figura 25).

Estos ciclos en el régimen pluvial fueron observados por varios autores. Vergara (2004) en su estudio sobre el comportamiento de las precipitaciones en el este de la provincia de La Pampa para el período 1921-2000, observó que las oscilaciones entre períodos secos y muy húmedos están separados por fases de transición que confirman la teoría de “péndulo climático” desarrollada por Suriano y Ferpozzi (1993). Feldman (2017) remarca la variabilidad climática de la región pampeana y subraya la falta de conocimiento para poder detectar un patrón en el comportamiento de las precipitaciones. Otros autores también registraron y evaluaron este comportamiento repetitivo de las precipitaciones, entre ellos a Roberto, *et al.* (1994), Perez, *et al.* (2003 y 2011) y Perez y Sierra (2012).

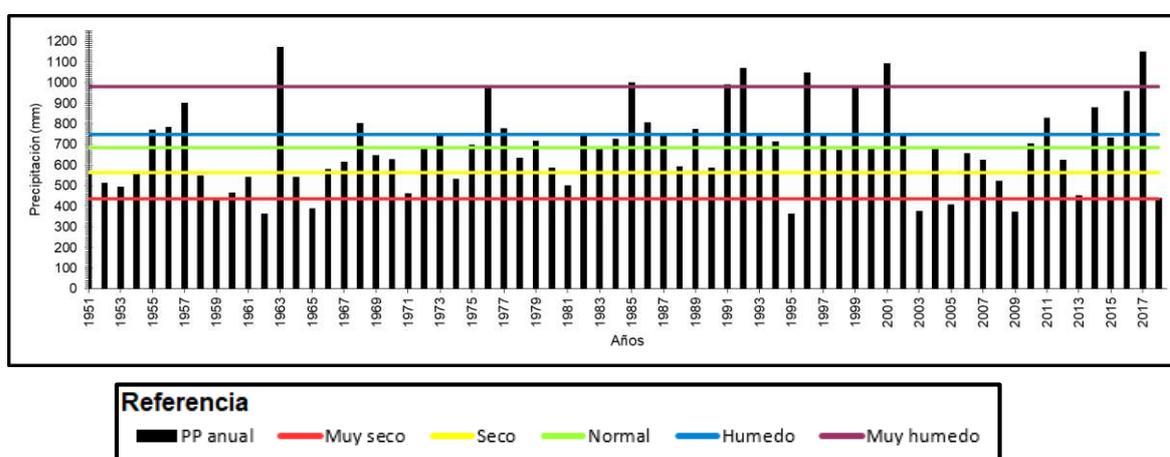


Figura 25. Precipitaciones anuales de Santa Rosa, La Pampa para la serie 1951-2018 y rangos de clasificación pluviométrica obtenida a partir de quintiles.

3.1.3.1.- Recurrencia de precipitaciones.

En la Figura 26 se representan las curvas de probabilidad de excedencia de las precipitaciones (A) y de precipitación en función del tiempo de recurrencia o período de retorno (B). Al analizar la primera se resuelve que cuanto mayor es el valor de la precipitación, menor es su probabilidad de ocurrencia o excedencia, mientras que cuanto menor sea el valor de precipitación mayor es la probabilidad de ocurrencia o excedencia. En cuanto a los tiempos de recurrencia, se observa que cuanto mayor es la precipitación su frecuencia es menor, mientras que cuanto menor sea la precipitación ocurrirá con mayor frecuencia temporal.

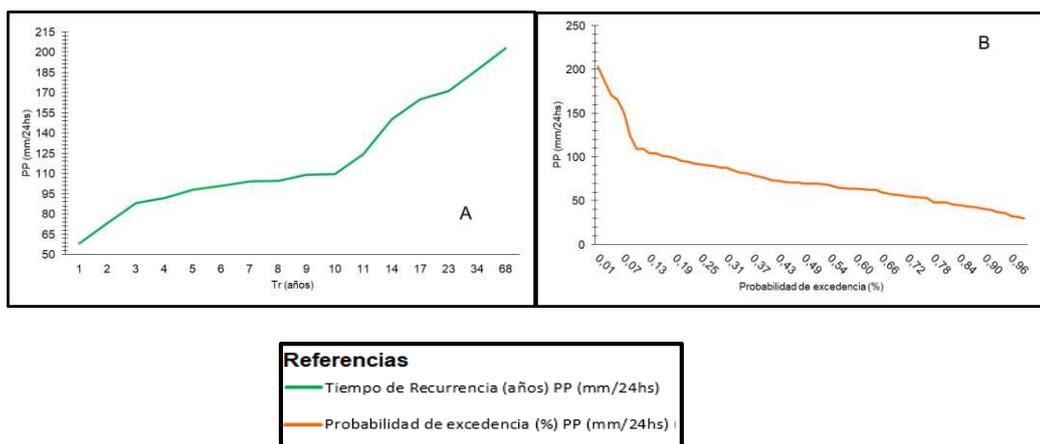


Figura 26. Curvas de período de retorno (A) y de probabilidad de excedencia porcentual (B) de precipitaciones diarias para la serie 1951-2018 para Santa Rosa, La Pampa.

Debido que para la modelación hidrológica se necesitan eventos con intensidades en mm/5min, se calcularon los tiempos de recurrencia y marcaron en ambas curvas eventos pluviométricos diarios obtenidos de la CPE con intensidades en mm/min ocurridos en el período 2012-2018 (Tabla 10) (Figura 27).

Tabla 10. Tiempos de recurrencia (años) y probabilidad de excedencia (%) de precipitaciones ocurridas en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa en el período 2012-2017.

FECHA (DD/MM/AAAA)	PRECIPITACIÓN (mm/24hs)	TIEMPO DE RECURRENCIA (años)	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)
15/10/2012	59,40	02	0,63
01/03/2013	78,80	03	0,32
04/10/2014	124,2	11	0,10
24/10/2016	56	01	0,76
29/03/2017	171,20	23	0,05

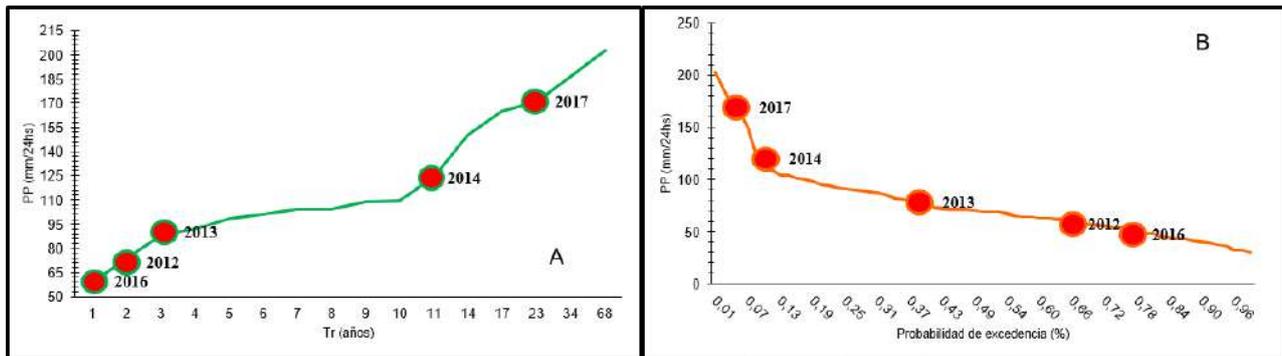


Figura 27. Curvas de período de retorno (A) y de probabilidad de excedencia porcentual (B) de precipitaciones diarias para la serie 1951-2018 para Santa Rosa, La Pampa. En puntos rojos se marcan 5 precipitaciones registradas en los años 2012, 2013, 2014, 2016 y 2017. ()

Se decidió realizar curvas I.D.F. para modelar debido a que no se cuentan con datos para todos los tiempos de recurrencia si se utilizan valores reales de precipitación. Además, debido a que este método está sujeto a la cantidad de años con los que se cuentan datos pluviométricos, utilizar valores de las tormentas de diseño creadas a partir de las curvas I.D.F. representa tener tiempos de recurrencia en un rango mayor.

3.1.3.2.- Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I.D.F.).

Con la utilización de los datos pluviométricos diarios para el período analizado 1951-2018 y como se detalló en el capítulo anterior, se realizaron las curvas I.D.F. por medio de regresión potencial.

Los análisis estadísticos de Chi Cuadrado (χ^2) y Kolmogorov-Smirnov (K-S) al 90%, 95% y 99% de nivel de confianza fueron aceptados siendo el coeficiente de Pearson en χ^2 de 3,089 para el 68,62% de los datos y para K-S, un valor de Dmax de 0,056 en el 98,28% de los datos (Figura 28). La mayor densidad de datos se encuentra dentro del intervalo de confianza con la distribución de probabilidad de Gumbel, siendo eventos extremos y menos probables aquellos con precipitaciones mayores a los 150 mm/24hs (Figura 29). Estos resultados coinciden con Puricelli y Casagrande (2015), quienes estudiaron las precipitaciones para Santa Rosa y concluye que se ajustan a esta distribución.

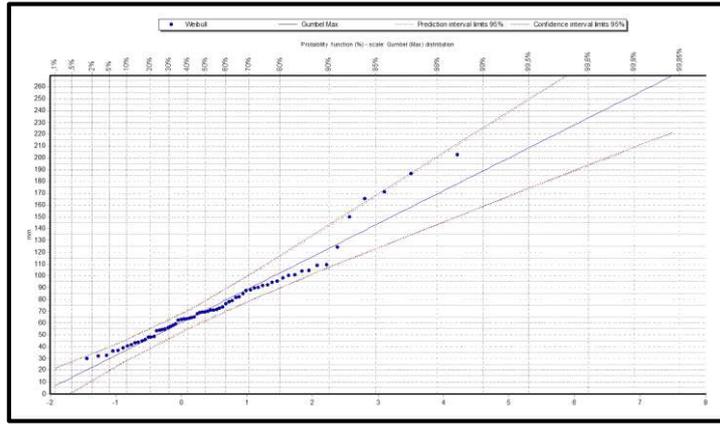


Figura 28. Función de Gumbel para precipitaciones máximas de 24 horas para Santa Rosa, La Pampa.

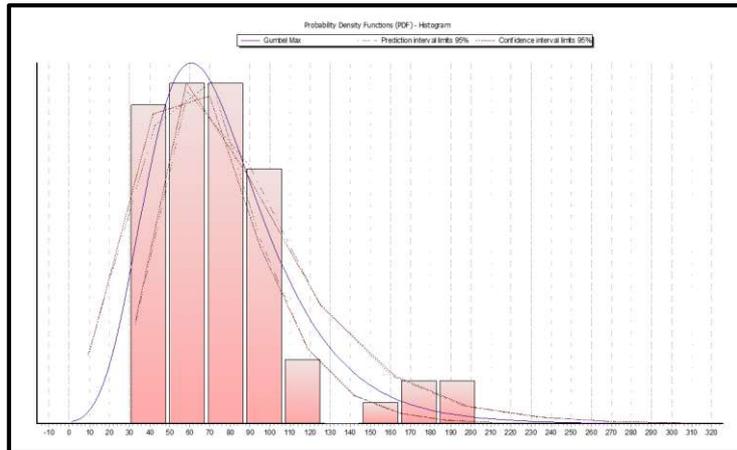


Figura 29. Histograma de Densidad y curva de Probabilidad de Gumbel con un intervalo de confianza del 95% para precipitaciones de 24 horas de precipitaciones máximas de Santa Rosa, La Pampa.

Los parámetros de la distribución de Gumbel resultaron: $\bar{x}=41,45$ mm, $S= 35,73$ mm; $\alpha=27,86$ mm y $\beta=25,38$ mm. Siguiendo este método, las precipitaciones diarias máximas probables, para los tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Probabilidad de ocurrencia de precipitación corregida por intervalo fijo en función a una variable reducida en función de distribución de Gumbel para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

PERÍODO DE RETORNO	VARIABLE REDUCIDA	PRECIPITACIÓN	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	CORRECCIÓN POR INTERVALO FIJO
Años	YT	X'T (mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0,3665	35,5860	0,50	40,2122
5	1,4999	67,1584	0,80	75,8890
10	2,2504	88,0621	0,90	99,5101
25	3,1985	114,4739	0,96	129,3555
50	3,9019	134,0677	0,98	151,4965
100	4,6001	153,5168	0,99	173,4740

En función de las probabilidades descritas anteriormente y de los coeficientes para las relaciones de lluvias con duración de 24 hs, se obtuvieron las siguientes precipitaciones e intensidades máximas (Tabla 12 y 13).

Tabla 12. Probabilidad de ocurrencia de precipitación corregida por intervalo fijo en función a una variable reducida en función de distribución de Gumbel para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

TIEMPO DE DURACIÓN	COCIENTE	PRECIPITACIÓN MÁXIMA Pd (mm) POR TIEMPOS DE DURACIÓN					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
		24 hs	X24	40,21	75,88	99,51	129,35
18 hs	X18 = 91%	36,59	69,05	90,55	103,48	137,86	157,86
12 hs	X12 = 80%	32,16	60,71	79,60	103,48	121,19	138,77
8 hs	X8 = 68%	27,34	51,60	67,66	87,96	103,01	117,96
6 hs	X6 = 61%	24,52	46,29	60,70	78,90	92,41	108,81
5 hs	X5 = 57%	22,92	43,25	56,72	73,73	86,35	98,88
4 hs	X4 = 52%	20,91	39,46	51,74	67,26	78,77	90,20
3 hs	X3 = 46%	18,49	34,90	45,77	59,50	69,68	79,79
2 hs	X2 = 39%	15,68	29,59	38,80	50,44	59,08	67,65
1 hs	X1 = 30%	12,06	22,76	29,85	38,80	45,44	52,04

Tabla 13. Intensidades de precipitación máximas (mm/hs) para tiempos de duración de hasta 24 horas en intervalos de 1, 2 y 6 horas para los tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

TIEMPO DE DURACIÓN		INTENSIDAD DE LA LLUVIA (mm/hs) SEGÚN EL PERÍODO DE RETORNO					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Hr	Min						
24 hs	1440	1,67	3,16	4,14	5,38	6,31	7,22
18 hs	1080	2,03	3,83	5,03	5,74	7,65	8,77
12 hs	720	2,68	5,05	6,63	8,62	10,09	11,56
8 hs	480	3,41	6,45	8,45	10,99	12,87	14,74
6 hs	360	4,08	7,71	10,11	13,15	15,40	17,63
5 hs	300	4,58	8,65	11,34	14,74	17,27	19,77
4 hs	240	5,22	9,86	12,93	16,81	19,69	22,55
3 hs	180	6,16	11,63	15,25	19,83	23,22	26,59
2 hs	120	7,84	14,79	19,40	25,22	29,54	33,82
1 hs	60	12,06	22,76	29,85	38,80	45,44	52,04

Con los resultados de intensidades máximas en 24 horas se obtuvieron la constante de regresión (d) y el Coeficiente de regresión (n) (Tabla 14).

Tabla 14. Resumen de la regresión potencial realizada para los distintos Tiempos de Retorno considerados para la construcción de curvas IDF para la serie de precipitaciones anual de 1951 a 2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

PERÍODO DE RETORNO (TR) (años)	CONSTANTE DE REGRESIÓN (d)	COEFICIENTE DE REGRESIÓN (n)
2	152,02	-0,61
5	286,9	-0,61
10	376,2	-0,61
25	533,68	-0,63
50	572,73	-0,61
100	655,82	-0,61

De esta manera, se construyeron las gráficas de intensidad y duración para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años con su correspondiente línea de tendencia del análisis de regresión potencial en función de las calculadas en la Tabla 15 (Figura 30 y 31).

Tabla 15. Regresión potencial para los períodos de retorno (TR) 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años en función de su constante de regresión (d) para obtener los valores del Término constante de regresión (K) y el Coeficiente de regresión (m) para las precipitaciones de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

Nº	TR	d	Ln x	Ln y	Ln x * Ln y	(Ln x)^2
1	2	152,02	0,69	5,02	3,48	0,48
2	5	286,90	1,60	5,65	9,10	2,59
3	10	376,90	2,30	5,93	13,65	5,30
4	25	533,68	3,21	6,27	20,21	10,36
5	50	572,73	3,91	6,35	24,84	15,30
6	100	655,82	4,60	6,48	29,86	21,20
6	192	2577,36	16,34	35,72	101,17	55,24

Ln (K) = 4,98 K = 144,89 m = 0,36

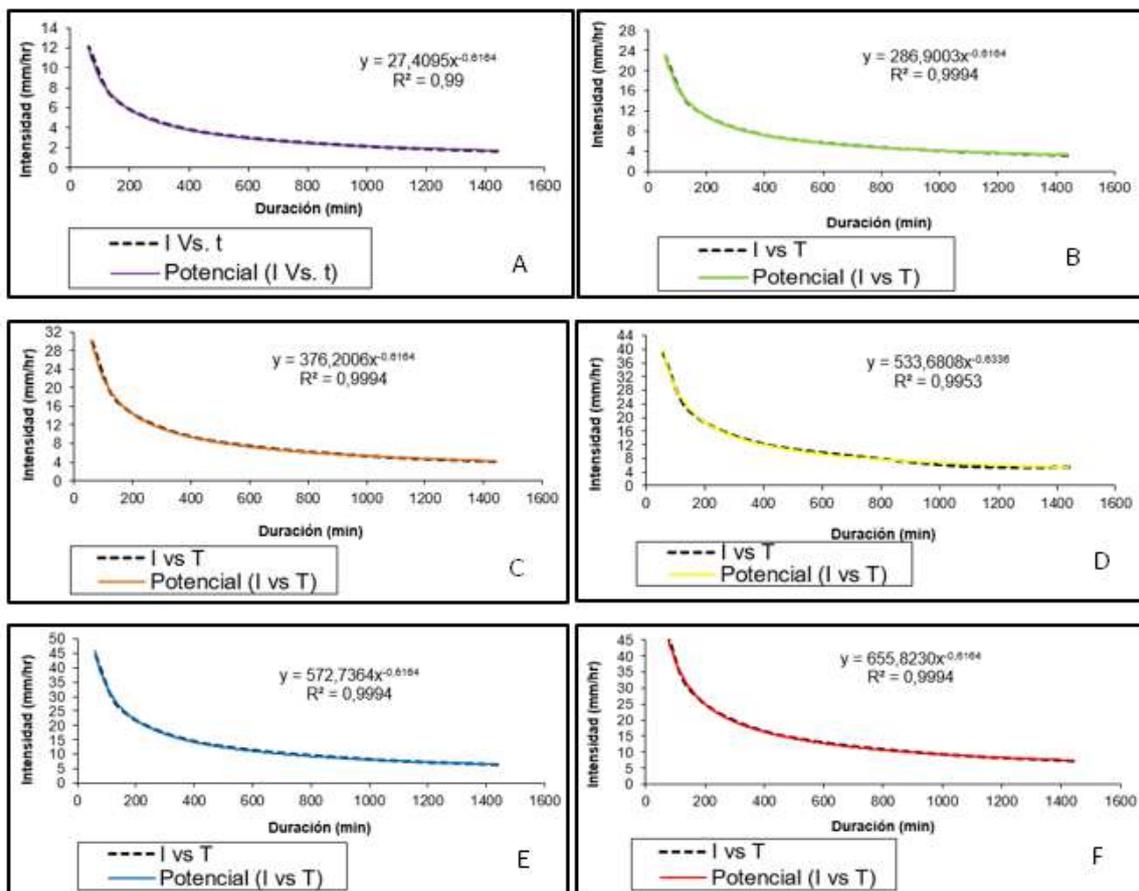


Figura 30. Línea de tendencia potencial para la relación entre Intensidad de precipitación (mm/hs) y duración (t) en minutos para precipitaciones con tiempo de recurrencia de 2 (A), 5 (B), 10(C), 25 (D), 50 (E) y 100 (F) años para precipitaciones de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa. Para todos los períodos de retorno el valor de R^2 es de 0,99.

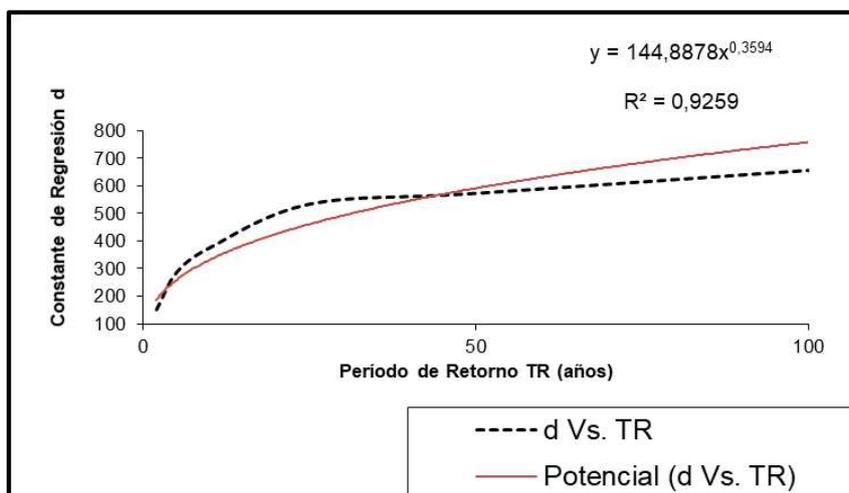


Figura 31. . Línea de tendencia potencial para la relación (R2 = 0,9259) entre Constante de Regresión (d) y Período de Retorno (TR) en años para precipitaciones de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

La Ecuación de Intensidad resultante para poder crear las curvas I.D.F. para el área de estudio resulta en:

$$I = \frac{144,88 \cdot TR^{0,3594}}{t^{-0,61}}$$

Ecuación 30. Intensidad para caso

de estudio

De esta manera, en la Tabla 16 se muestran los valores de intensidad para los distintos tiempos de recurrencia con precipitaciones de intervalos de 5 minutos.

Tabla 16. Valores de Intensidad (mm/h) para precipitaciones de períodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años con intervalos de duración de 5 minutos hasta una hora para registro pluviométrico de la serie 1951-2018 para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

TR (AÑOS)	DURACIÓN EN MINUTOS											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	68,6	44,7	34,7	29,1	25,3	22,6	20,5	18,9	17,6	16,5	15,5	14,7
5	95,4	62,1	48,3	40,4	35,2	31,4	28,6	26,3	24,5	22,9	21,6	20,5
10	122,	79,7	62,0	51,9	45,2	40,4	36,7	33,8	31,4	29,4	27,7	26,3
25	170,	110,	86,2	72,1	62,8	56,1	51,0	47,0	43,6	40,9	38,5	36,5
50	218,	142,	110,	82,5	80,6	72,0	65,4	60,2	56,0	52,5	49,5	46,9
100	280,1	182,4	141,9	118,7	103,4	92,4	84,0	77,3	71,9	67,3	63,5	60,1

La Figura 32 muestra, a partir de datos pluviométricos diarios de la serie 1951-2018, las curvas de I.D.F. para precipitaciones con tiempos de recurrencia de hasta 100 años para la ciudad de Santa Rosa.

En el eje de las ordenadas se encuentran los valores de intensidad de precipitación (mm/hs) y en el eje de las abscisas el tiempo o duración en minutos de los eventos pluviométricos. En color violeta se encuentran las intensidades y duraciones para precipitaciones de tiempo de recurrencia de 2 años, en verde de 5 años, en naranja de 10 años, en amarillo de 25 años, en azul de 50 años y en rojo de 100 años. Por lo que, en la ciudad de Santa Rosa, una precipitación teórica de 30 minutos de duración con una intensidad de casi 75 mm/h se produce cada 50 años.

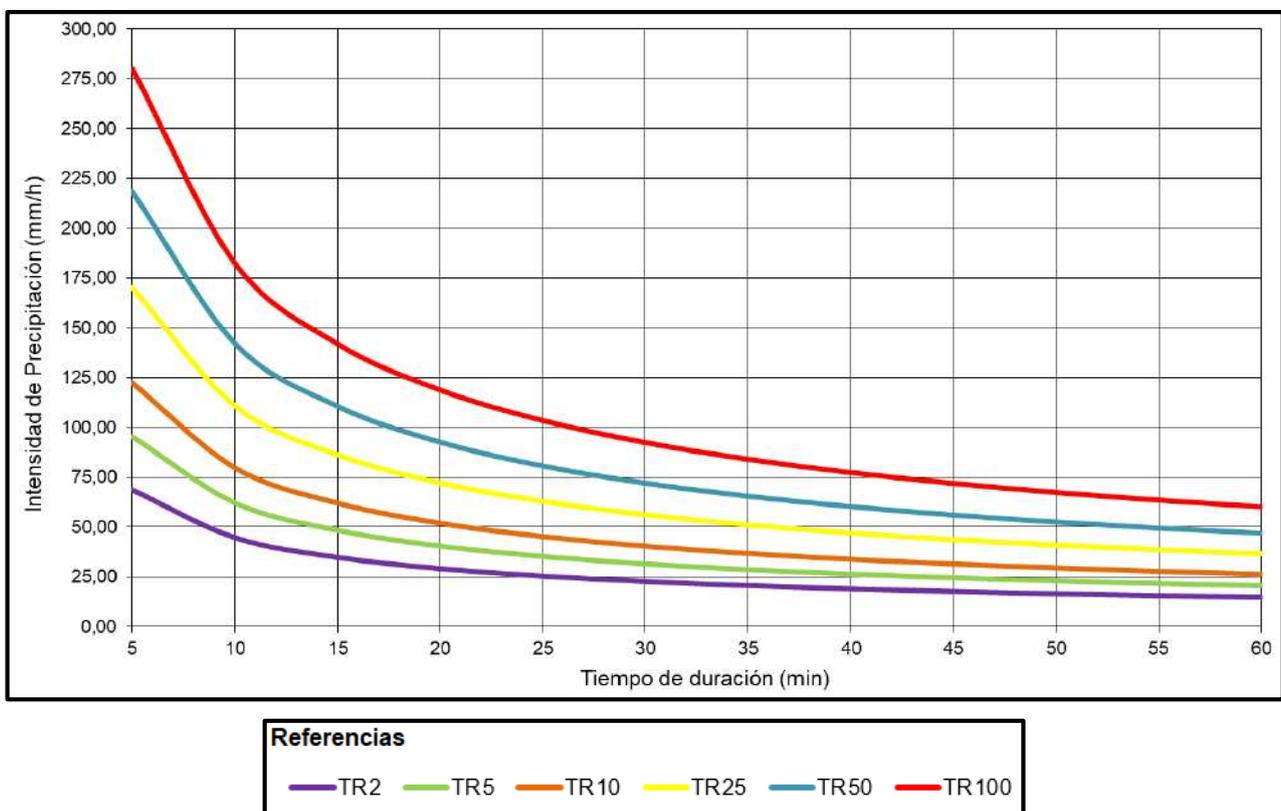


Figura 32. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I.D.F.) para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

3.1.3.3.- Tormentas de diseño.

La Figura 33 presenta los hietogramas de las tormentas de diseño para los tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para precipitaciones de una hora para la ciudad de Santa Rosa elaboradas por medio del método de Bloque Alterno. En color violeta se encuentran las precipitaciones para tiempos de recurrencia de 2 años, en verde de 5 años, en naranja de 10 años, en amarillo de 25 años, en azul de 50 años y en rojo de 100

años. Los valores de precipitación media de cada evento para cada período de retorno son 14,75; 20,50; 26,30; 36,56; 46,91 y 60,18 mm respectivamente.

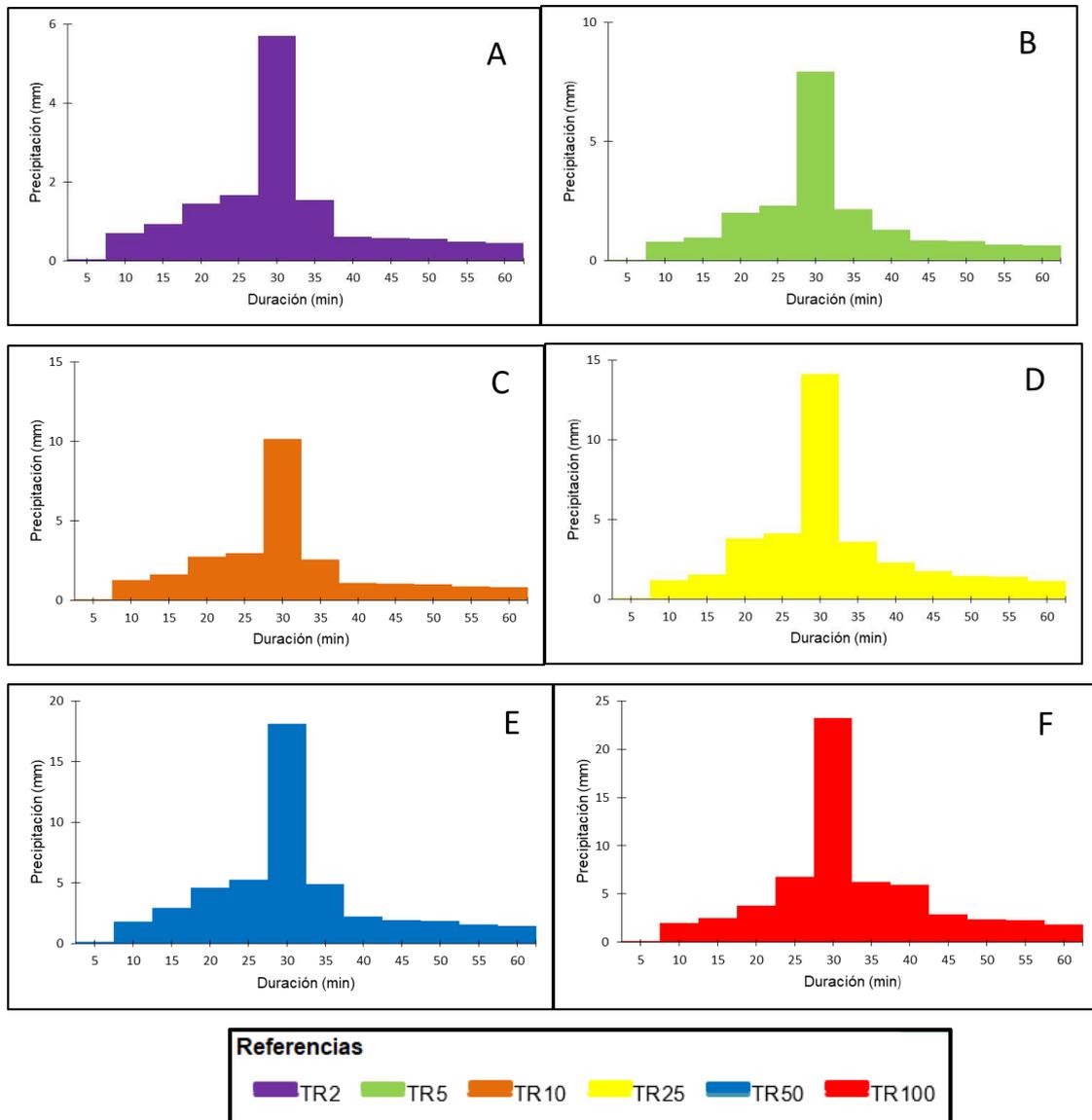


Figura 33. Tormentas de Diseño para tiempos de recurrencia de 2 (A), 5 (B), 10 (C), 25 (D), 50 (E) y 100 (F) años para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

Devoto (2002) realizó un análisis de precipitaciones máximas para la construcción de curvas I.D.F. para Argentina y crea un mapa de isolíneas con rangos de precipitaciones medias en una hora para todo el país (Figura 34)

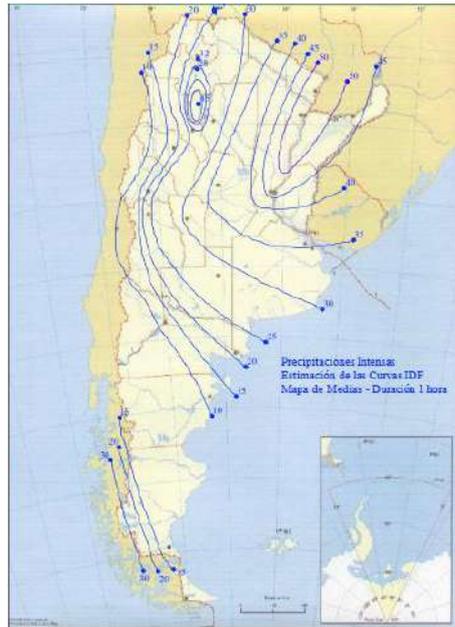


Figura 34. Regionalización de precipitaciones medias (mm) de duración de una hora. (Devoto, 2002 en Bertoni, 2004)

La precipitación media de duración de 1 hora evaluada por Devoto (2002) para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa se encuentra en el rango entre 25 a 30 mm, mientras tanto, la precipitación media de duración de 1 hora calculada en esta tesina es de 34,2 mm. Por lo cual, el error de las tormentas de diseños calculadas a partir de las curvas IDF se aceptan con un 12%. Este error coincide con Varena *et al.* (2004) quien compara el método Devoto para diferentes localidades de Argentina y concluye que la cantidad de datos pluviométricos con los que se cuenta para realizar el estudio, las características geográficas y la regionalización influyen en el valor del error.

Cabe señalar que Puricelli y Casagrande (2015), revisan el método de creación de curvas de intensidad-duración-frecuencia con el método de regresión potencial de la distribución de Gumbel, concluyendo que sus resultados coinciden de buena manera con los evaluados con métodos tradicionales de construcción de estas curvas. Por lo que, la bibliografía respalda la utilización del método de regresión potencial para la obtención de curvas I.D.F., por lo que resulta más robusta que la regla de Laplace. Por estas razones, se consideró que las precipitaciones a utilizar en la modelación hidrológica-hidráulica fueran las de diseño.

3.1.3.-Discretización espacial de las subcuencas SV1 y SV2 en SWMM

Las subcuencas SV1 (Figura 35) y SV2 (Figura 36) corresponden a la misma área, ubicada en una porción del Barrio Villa Elvina, SV1 fue constituida con calles como conductos, mientras que SV2 cuenta no solo con las calles como conductos sino también como subcuencas. En ambos esquemas, las manzanas se conforman de subcuencas, las calles se representan como conductos abiertos en líneas verdes para SV1 y rojas para SV2, conectados por nodos en puntos rojos para SV1 y amarillos para SV2. Se grafica el Sistema Mayor que aporta agua al sistema pluvial o Sistema Menor conectado por medio de vertederos tipo sumidero mediante el símbolo ►◄ verde para SV1 y rojo para SV2.

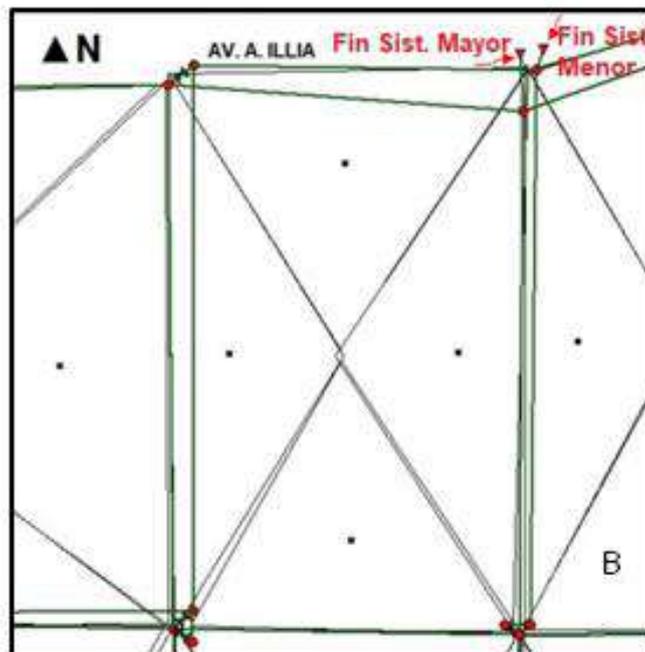
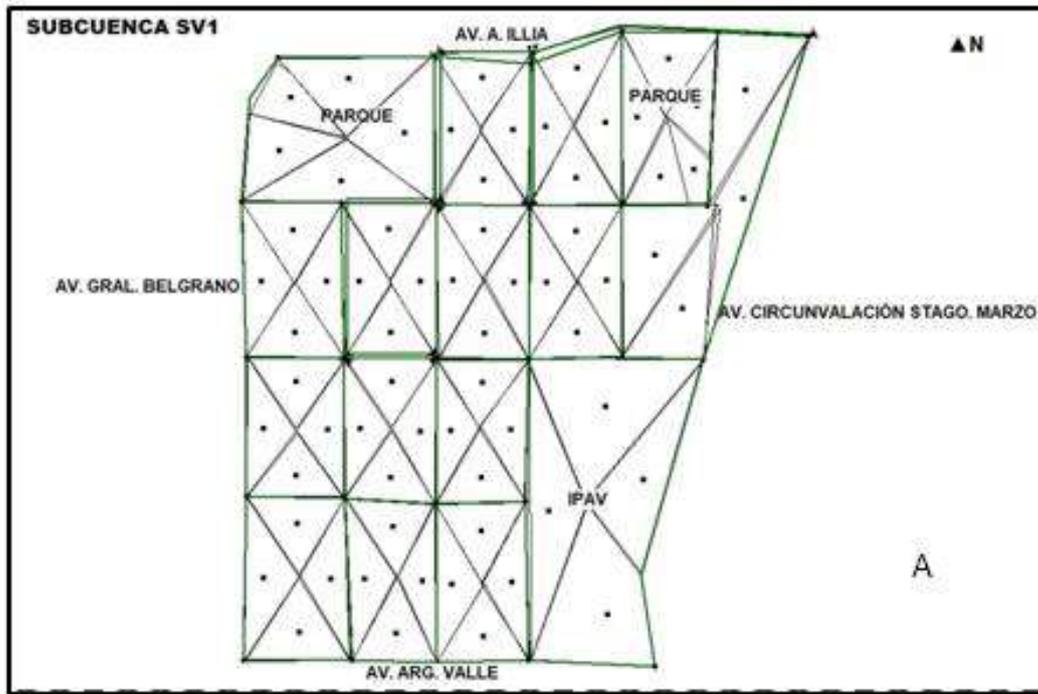


Figura 35. Esquema de conceptualización del modelo en (A) subcuencia SV1 constituida a partir de una porción del barrio Villa Elvina y (B) la descripción de sus componentes.

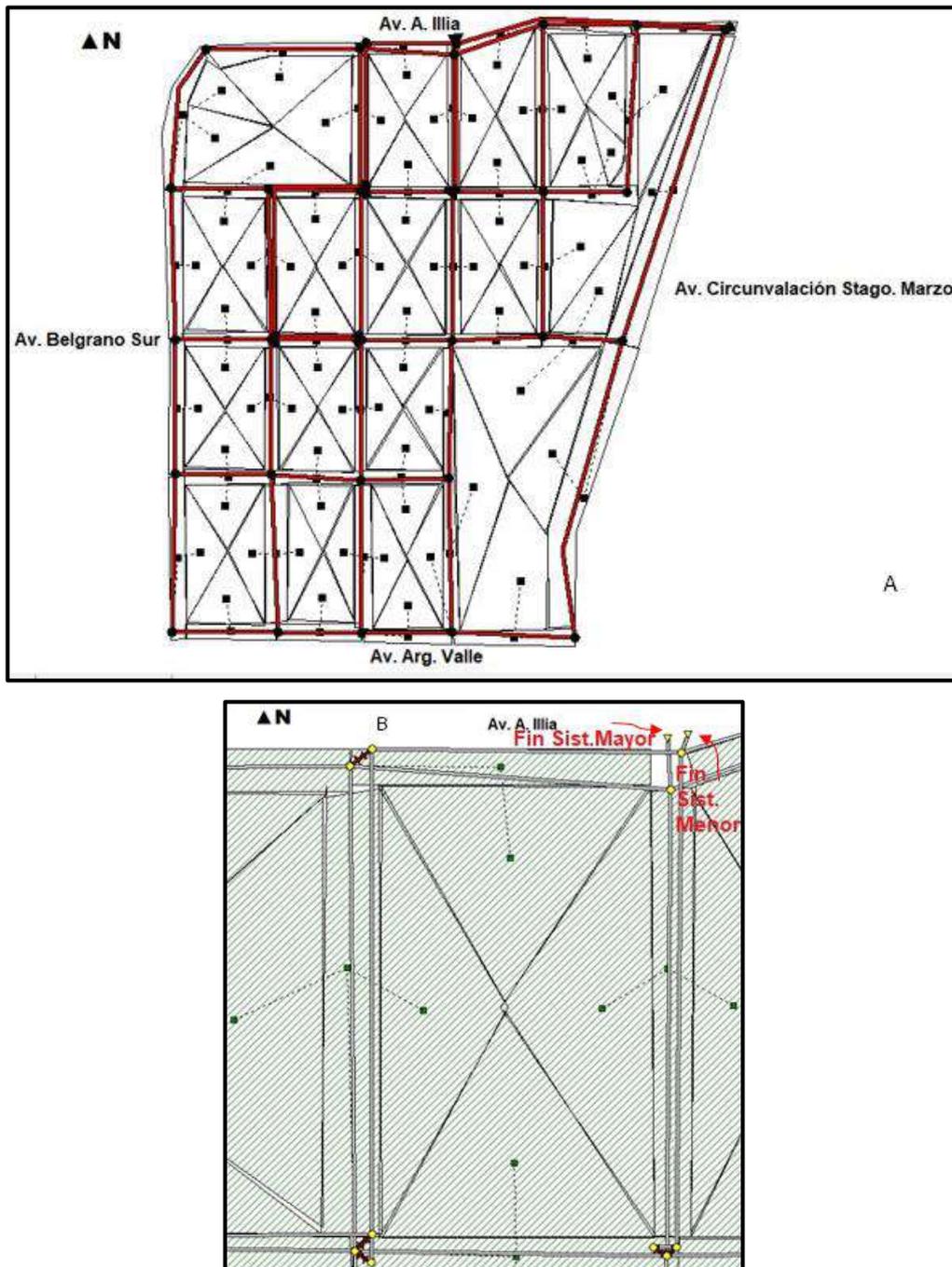


Figura 36. Esquema de conceptualización del modelo en (A) subcuenca SV2 constituida a partir de una porción del barrio Villa Elvina y (B) la descripción de sus componentes.

Los conductos fueron diseñados a partir de la constitución de secciones transversales para asemejar su estructura a la realidad. Se confeccionaron dos secciones, una utilizada para las calles en general (Figura 37 A) y otra para la calle de salida de la cuenca debido a sus características particulares (Figura 37 B).

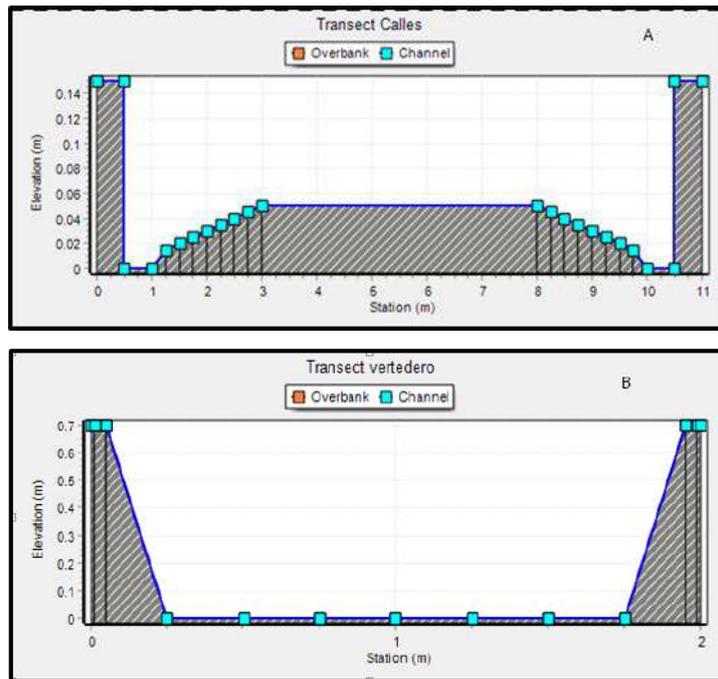


Figura 37. Esquema conceptual del modelo de sección transversal de calles para los conductos (A) y para el final de la subcuenca (B) de forma irregular para las subcuencas SV1 y SV2. En las ordenadas se encuentra la elevación (m) de la sección y en las abscisas la longitud perpendicular del conducto (m).

Las calles del barrio Villa Elvina de Santa Rosa, La Pampa, tienen 10 metros de ancho, las orientadas N-S tienen 100 de largo, las orientadas E-O tienen 65 metros de largo y 0,15 m de alto. La calle del final de las subcuencas tiene 2 metros de ancho, 4 metros de largo orientada N-S y 0,7 m de altura; además, la parte superior se encuentra techada.

3.1.4.- Muestreos de Altura de Pelo de Agua.

Se midieron las alturas de pelo de agua (cm) en los finales de las subcuencas SV y SC (Figura 38).



Figura 38. Toma de medidas de altura de pelo de agua (m) en la subcuenca SV.

Los eventos de precipitación observados y las alturas de pelo de agua se encuentran en la Tabla 17 y Figuras 39 y 40.

Tabla 17. Precipitaciones (mm) y alturas de pelo de agua máximas (cm) observadas en diferentes eventos en las cuencas SV y SC en Santa Rosa, La Pampa.

Subcuenca	Fecha	Precipitación (mm)	Altura de pelo de agua máximo(cm)
SV	7 de mayo de 2018	8	5
	27 de septiembre de 2018	33,8	3
	4 de noviembre de 2018	12,4	7
SC	13 de noviembre de 2018	8,6	3
	8 de diciembre de 2018	11,4	2,5
	10 de diciembre de 2018	41	5
	13 de febrero de 2019	4,4	3

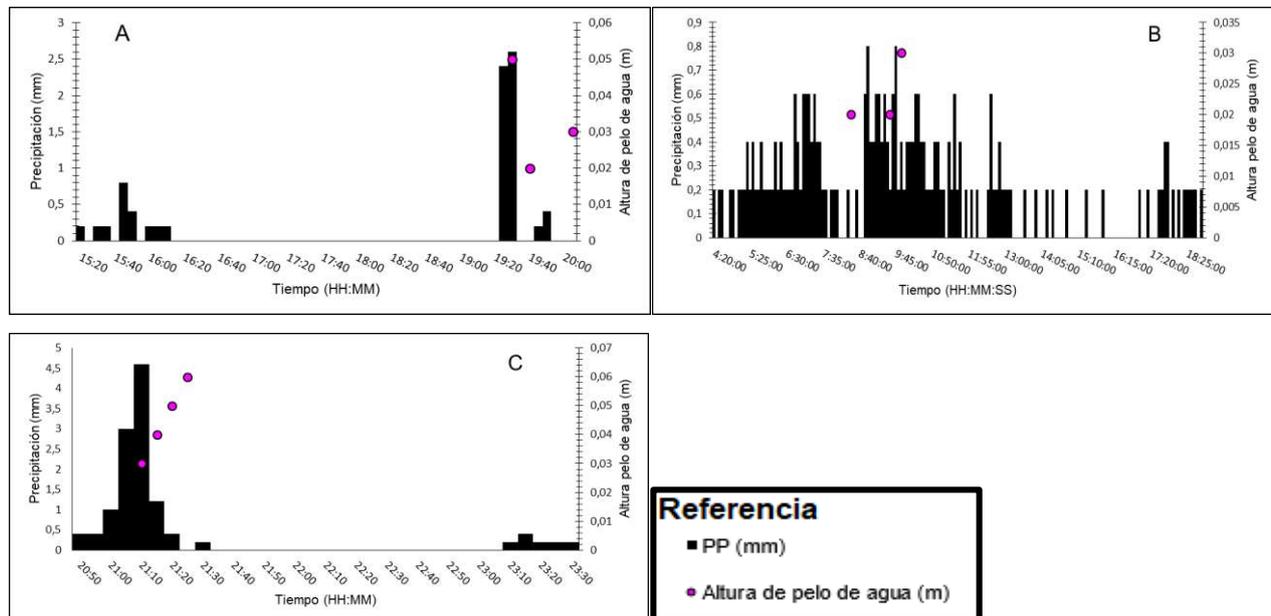


Figura 39. Hietogramas de eventos reales sucedidos en la ciudad de Santa Rosa los días 7 de mayo (A), 27 de septiembre (B) y 4 de noviembre (C) del año 2018 y medición de pelo de agua en final de la cuenca SV.

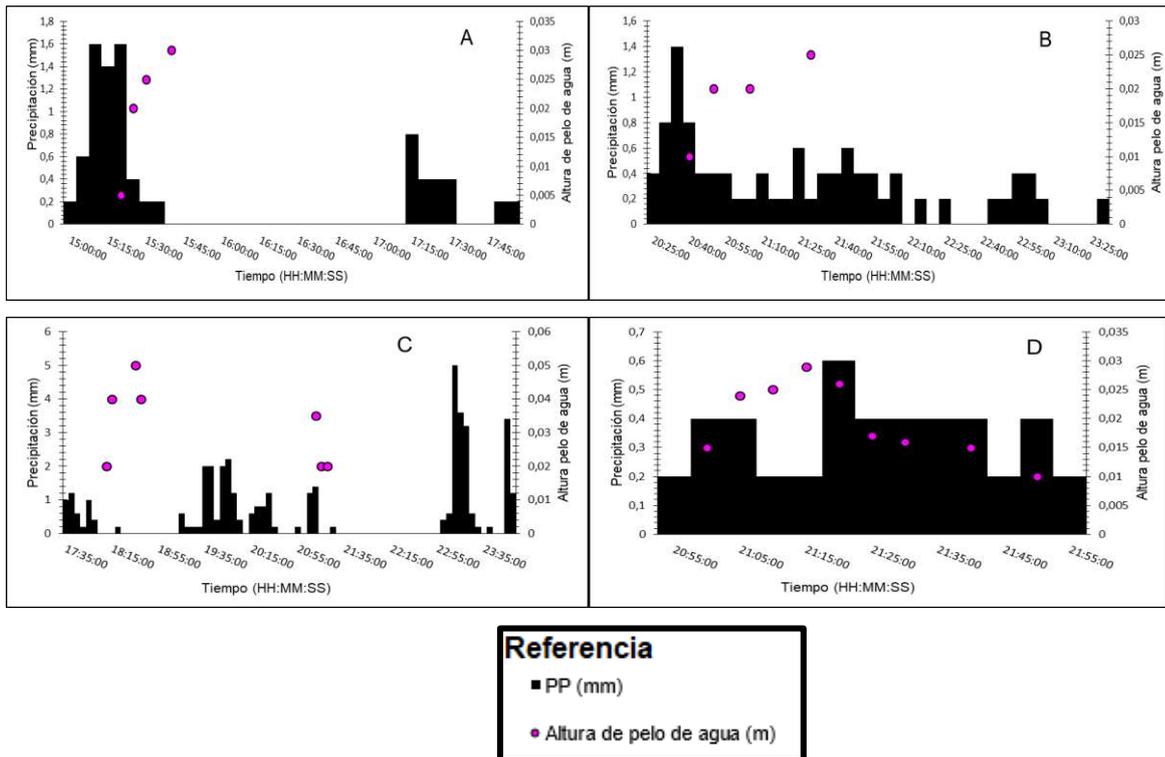


Figura 40. Hietogramas de eventos reales sucedidos en la ciudad de Santa Rosa los días 13 de noviembre (A), 8 de diciembre (B), 10 de diciembre (C) del año 2018 y 13 de febrero del año 2019 (D) y medición de pelo de agua en final de la cuenca SC.

Se puede visualizar que los eventos pluviométricos no tuvieron intensidades elevadas ni grandes volúmenes.

3.1.5.- Análisis de sensibilidad

3.1.5.1.-Sensibilidad a la estructura.

Se realizó una simulación con tormentas de diseño para TR=2 y TR=100 años a modo de corroborar la sensibilidad ante un evento recurrente y uno extremo. Así mismo, se compararon los resultados modelados de las alturas de pelo de agua (m) (Figura 42) y los caudales de salida de la cuenca en los Sistemas Mayor y Menor (m^3/s) (Figura 43 y 44) entre las subcuencas SV1 y SV2.

El modelo posee sensibilidad a la estructura (Figuras 41, 42 y 43). Por otro lado, los valores para alturas de pelo de agua (Figura 41) y caudales del sistema menor (Figura 42) resultaron mayores para la subcuenca SV2 mientras que los valores de caudales de salida del sistema mayor (Figura 43) resultaron mayores para la subcuenca SV1. Además, la subcuenca SV1 alcanza el caudal pico antes que SV2.

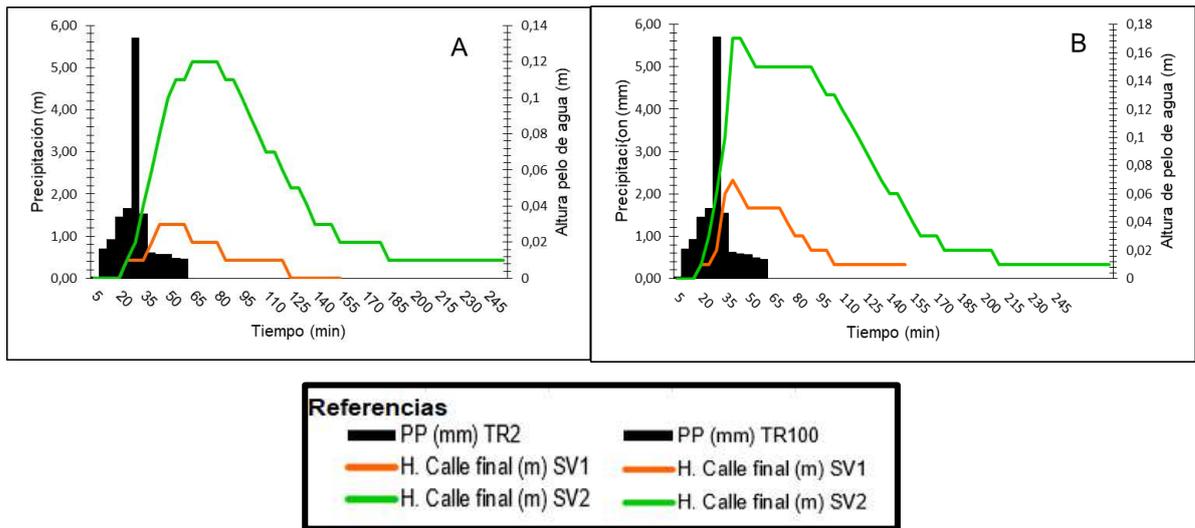


Figura 41. Relación de alturas de pelo de agua (m) en la calle final de las subcuencas SV1 y SV2 correspondientes a una porción del barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 (A) y 100 (B) años de tiempo de recurrencia.

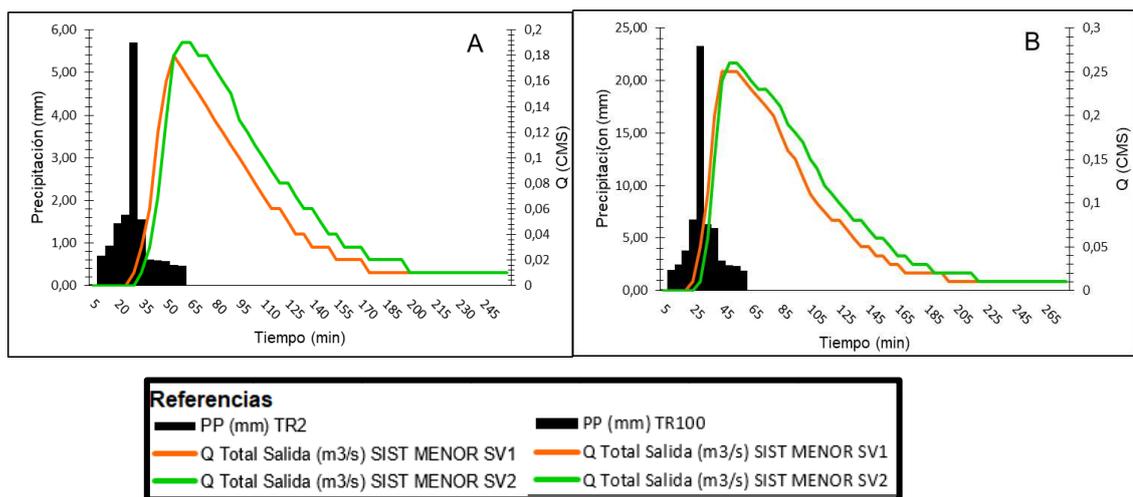


Figura 42. Relación de caudales de salida del sistema menor (m3/s) de las subcuencas SV1 (en líneas naranjas) y SV2 (en líneas verdes) correspondientes a una porción del barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 (A) y 100 (B) años de tiempo de recurrencia.

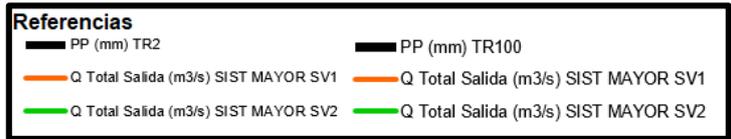
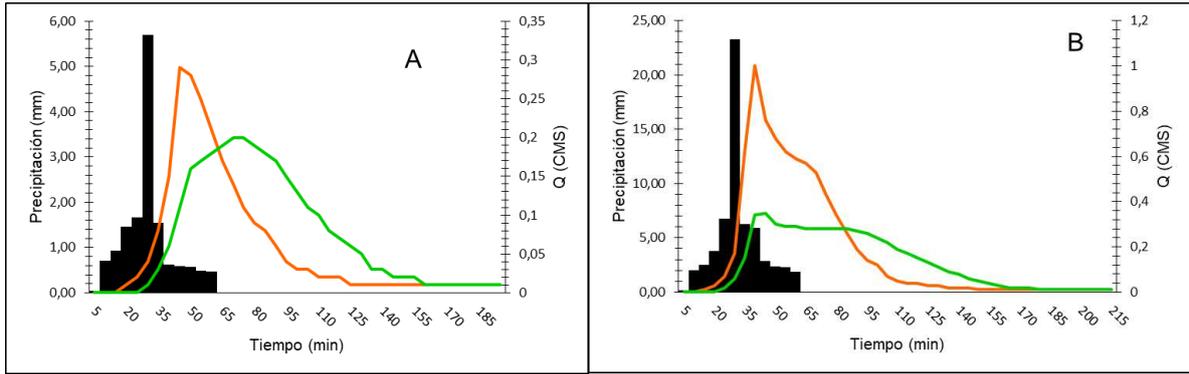


Figura 43. Relación de caudales de salida del sistema mayor (m3/s) de las subcuencas SV1 y SV2 correspondientes a una porción del barrio Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 (A) y 100 (B) años de tiempo de recurrencia.

Se compararon valores observados de altura de pelo de agua (m) con respecto a valores simulados en las subcuencas SV1 y SV2 para los eventos del día 7 de mayo, 27 de septiembre y 04 de noviembre del año 2018 (Figura 44). Visualmente los resultados proporcionados por el modelo para la subcuenca SV2 son los que mejor ajustan con respecto a los valores observados.

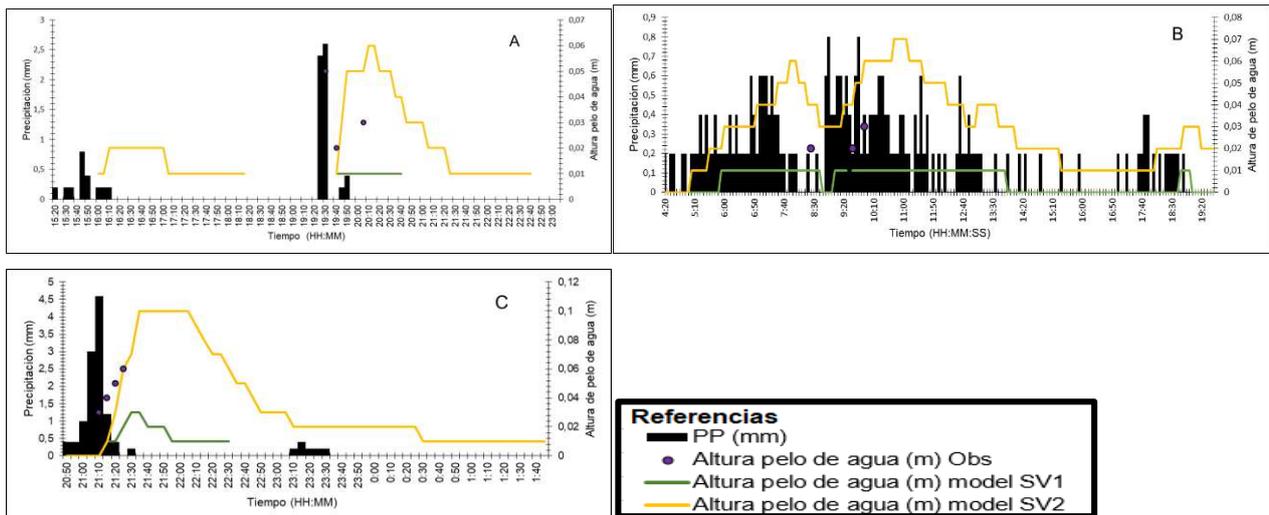


Figura 44. Relación entre alturas de pelo de agua (m) simulado y observado para las subcuencas SV1 y SV2 correspondientes al barrio Villa Elvina para una precipitación del día 7 de mayo (A), 27 de septiembre (B) y 04 de noviembre (C) del año 2018 en Santa Rosa, La Pampa.

Los valores de p y el coeficiente de correlación para las alturas del pelo de agua de cada evento registrado en función de las simulaciones se presentan en la Tabla 18. Para dos de los tres eventos el valor de p es menor para SV2 que para SV1 y el valor de correlación es mayor para SV2. Los valores NA correspondientes a la fecha 27 de septiembre de 2018 para la subcuenca SV1 se deben a que los resultados de simulación poseen para todos los tiempos el mismo valor de altura de pelo de agua (0,01m), por lo tanto la varianza de estos datos es cero, por lo que, se consideró que no poseen correlación con los valores observados.

Tabla 18. Resultados de test de correlación de Pearson con valor de correlación y p valor para las subcuencas SV1 y SV2 en contraste con los valores observados. En negrita se muestran los valores de p que resultan significativos.

Fecha	Subcuencas	Valor de correlación	Valor de p
07/05/2018	SV1	0,645	0,1174
	SV2	0,93	0,0023
27/09/2018	SV1	NA	NA
	SV2	0,855	0,0297
04/11/2018	SV1	0,973	0,0266
	SV2	0,851	0,1489

Warwick, *et al.*(1991) evaluaron la respuesta al análisis de sensibilidad a la estructura de modelación del modelo SWMM bajo distintos niveles de discretización del paisaje y concluye que la respuesta es significativa. Así también, Zaghloul (1983) y Davis, *et al.* (2006) trabajaron en la sensibilidad a los parámetros del modelo ancho y pendiente de las subcuencas y largo de los conductos, entre otros, que aunque no es el mismo análisis que se realiza en esta tesis, denota la sensibilidad del SWMM a los cambios estructurales en la constitución del modelo. Stehli, *et al.* (2016) discretizaron una cuenca urbana del Rio Cascavel en Brasil, con las calles como subcuencas de la misma manera que en SV2. Lee, *et al.* (2018) caracterizaron y compararon distintos tipos de discretización en SWMM. Estos últimos autores concluyen que cuanto más detalle posea la estructura del modelo, resulta más simple su calibración, disposición y la evaluación de la efectividad de los SDUS.

3.1.5.2.- Sensibilidad N Manning.

Para las subcuencas existen dos parámetros de N de Manning en el modelo SWMM, uno perteneciente a las áreas impermeables y otro a las áreas permeables. En las Figuras 45 a 48 se muestran las gráficas correspondientes al caudal (m^3/s) y altura de pelo de agua

(m) para la salida de la cuenca SV2 luego de eventos de precipitación con tiempos de recurrencia de 2 y 100 años para distintos valores de N de Manning.

El modelo resulta sensible al parámetro de rugosidad de Manning en las áreas impermeables de las subcuencas, mientras que, con precipitaciones de mayor intensidad, como con una tormenta de diseño de TR=100 años, las diferentes respuestas para distintos N de Manning se suavizan. En las Figuras 45 y 46, se aprecian las distintas salidas del modelo con diferentes valores del parámetro.

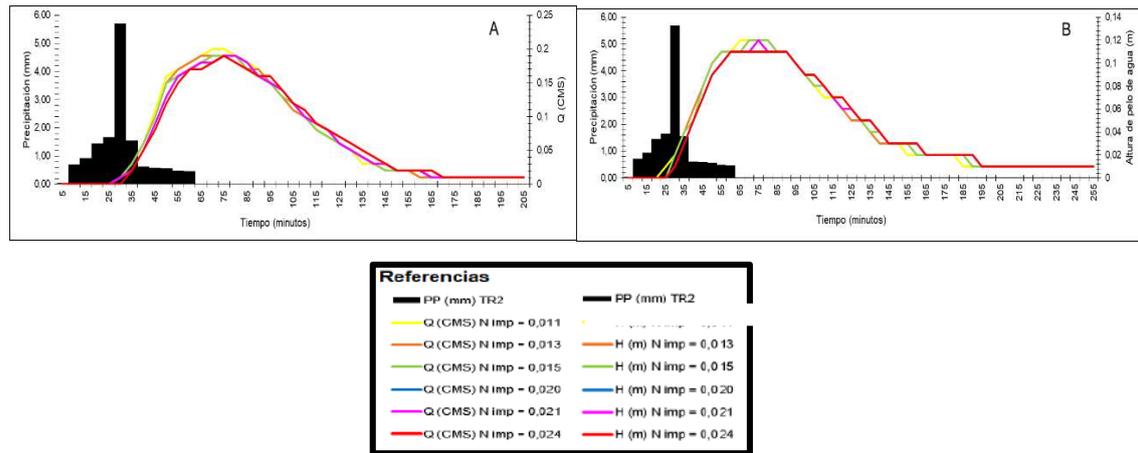


Figura 45. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.

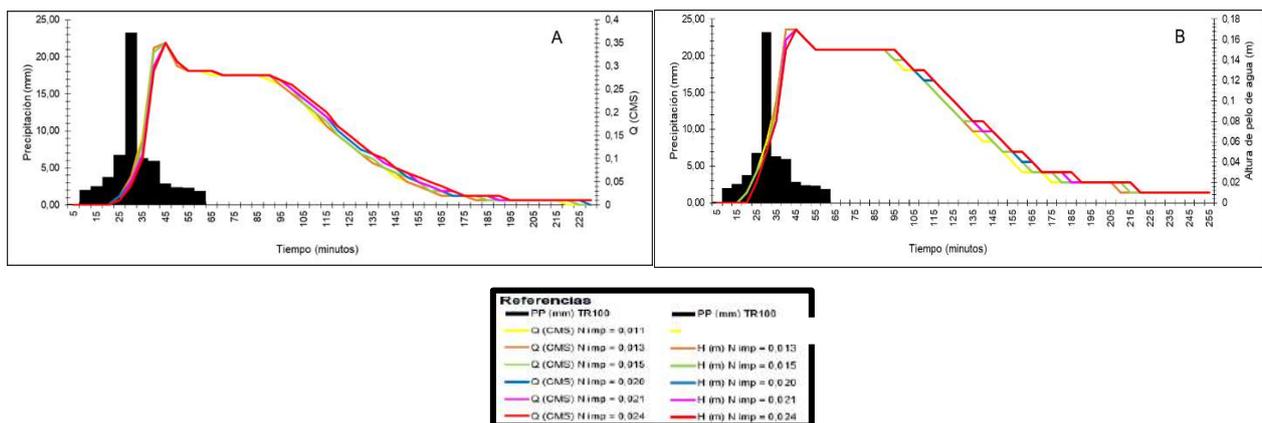


Figura 46. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.

Además, el N de Manning en el rango de 0,011 - 0,024 para áreas permeables también resulta ser un parámetro sensible (Figuras 47 y 48). Se observa como la respuesta del modelo es influenciado por la magnitud de las precipitaciones y se aproximan los valores

de altura de pelo de agua y caudal, con diferentes valores de parámetro, cuanto mayor son las precipitaciones.

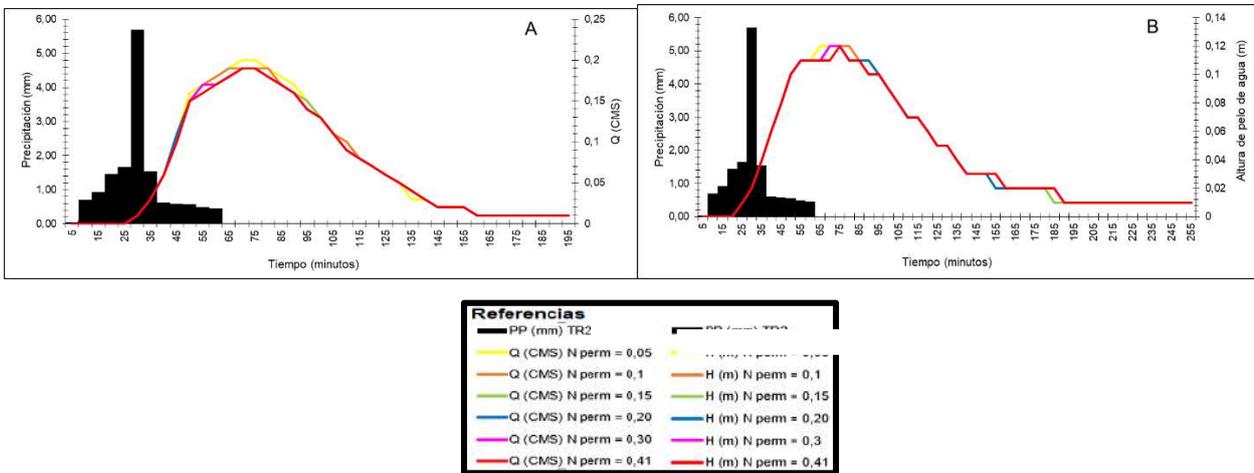


Figura 47. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.

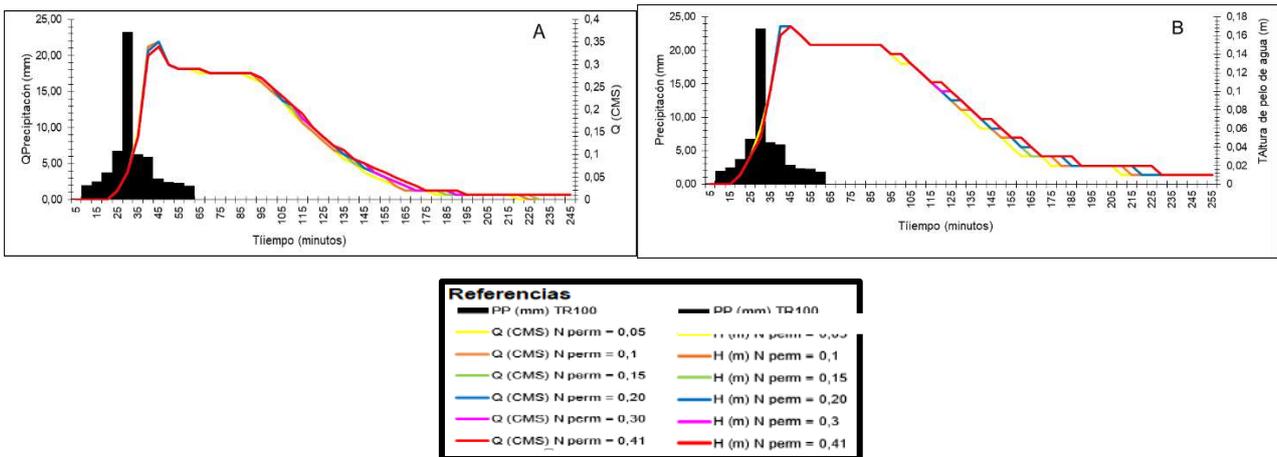


Figura 48. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.

El parámetro de rugosidad N de Manning en los conductos, con valores del parámetro en el rango de 0,013 - 0,017, no resulta ser sensible con precipitaciones de diseño tanto de TR= 2 o TR=100 años (Figura 49 y 50).

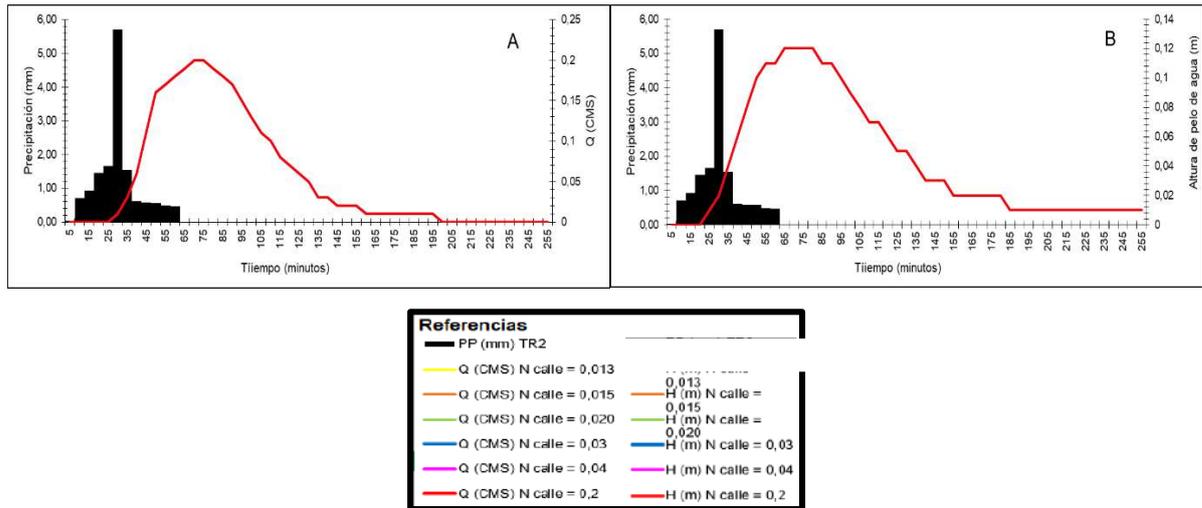


Figura 49. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para conductos en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.

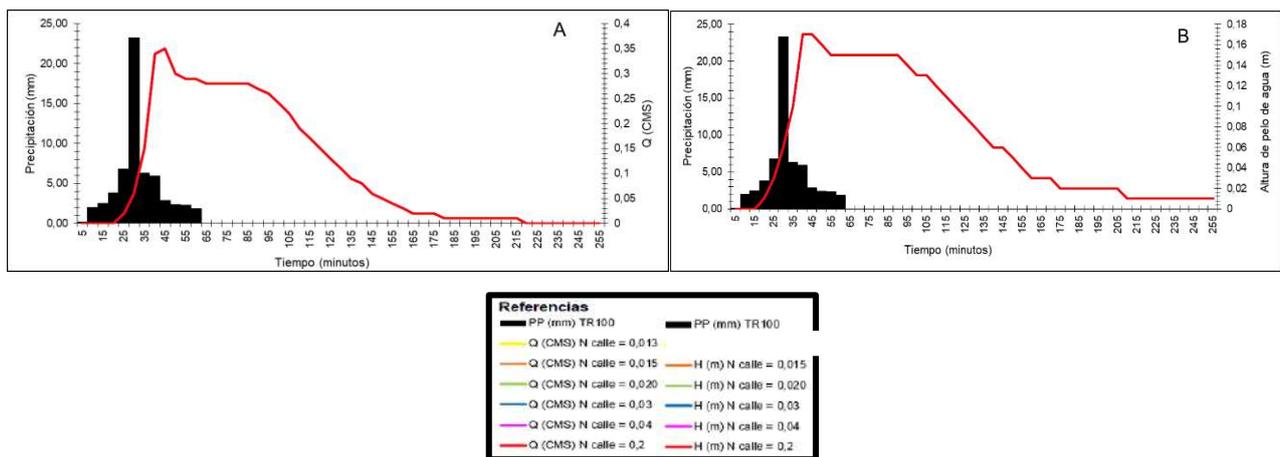


Figura 50. Comparación resultados de diferentes valores de N de Manning para conductos en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.

El comportamiento del modelo tras la modificación de los valores de N de Manning resulta ser sensible solo cuando se trata del parámetro de rugosidad de las subcuencas. Mendez-Morales (2012) realiza el análisis de sensibilidad y calibración del modelo SWMM para una cuenca urbana de Costa Rosa con la utilización del software PEST, concluye que dentro de los parámetros que evalúa, el N de Manning de las subcuencas se encuadra dentro de los más sensibles. Zaghloul (1983) también concluye que la sensibilidad al coeficiente N de Manning es significativa y que el *routing* de los conductos no posee sensibilidad significativa.

3.1.5.3.- Sensibilidad al almacenamiento en depresión. El parámetro de almacenamiento en depresión en áreas impermeables de las subcuencas resulta sensible a la modelación en el rango de 1,25 - 5 mm para las subcuencas (Figura 51). Se puede observar que el modelo no es sensible a este parámetro con precipitaciones de mayor magnitud, como es el caso de la tormenta de diseño con tiempo de recurrencia de 100 años (Figura 52).

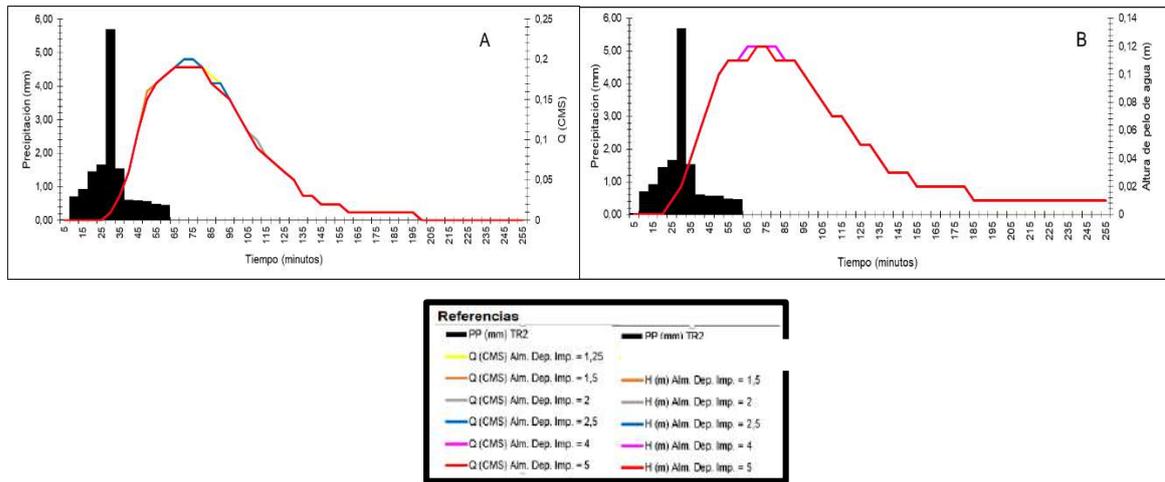


Figura 51. Comparación resultados de diferentes valores de almacenamiento en depresión de áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.

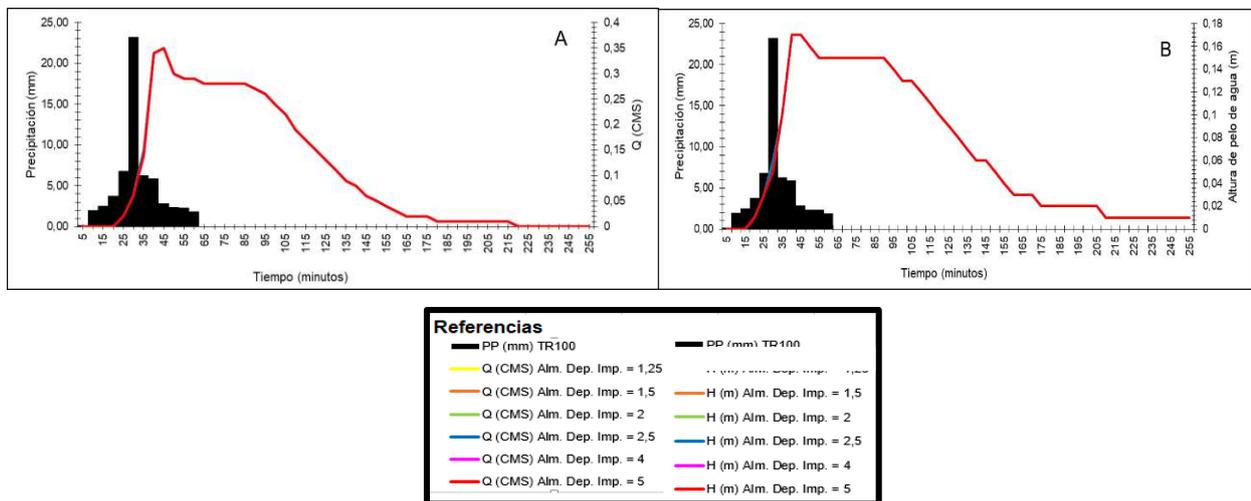


Figura 52. Comparación resultados de diferentes valores de almacenamiento en depresión de áreas impermeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.

De la misma manera que el parámetro de N de Manning para las subcuencas, el almacenamiento en depresión también se diferencia entre áreas permeables e impermeables.

El modelo resulta sensible a la variación del parámetro dentro del rango 2,5-5 mm para las subcuencas (Figura 53). Sin embargo, cuando la tormenta es de mayor magnitud esta sensibilidad se pierde (Figura 54). El modelo resulta ser visualmente más sensible a la variación de almacenamiento en depresión en áreas permeables (Ver Figura 54 A y B).

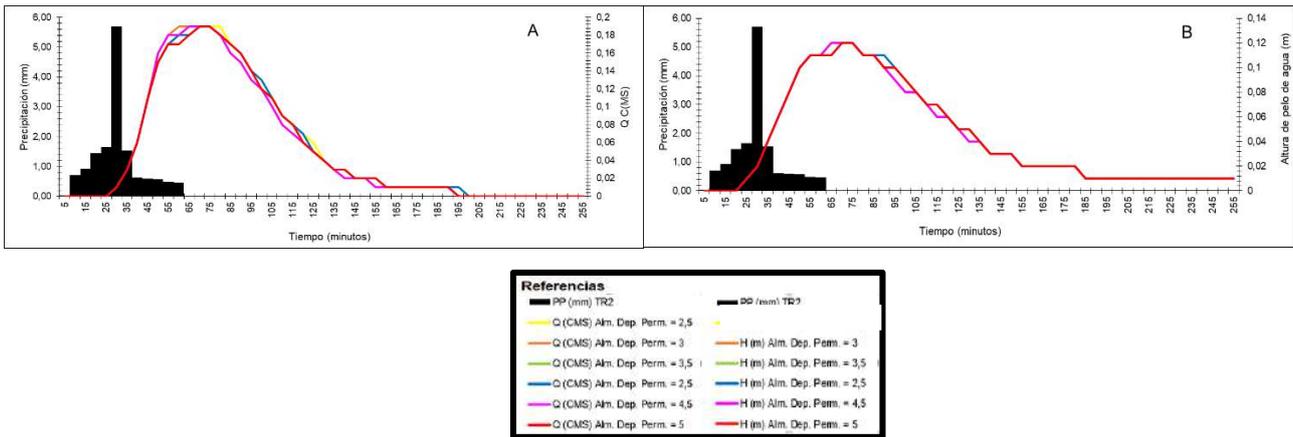


Figura 53. Comparación resultados con diferentes valores de almacenamiento en depresión de áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) (B) de la última calle del sistema SV2 con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.

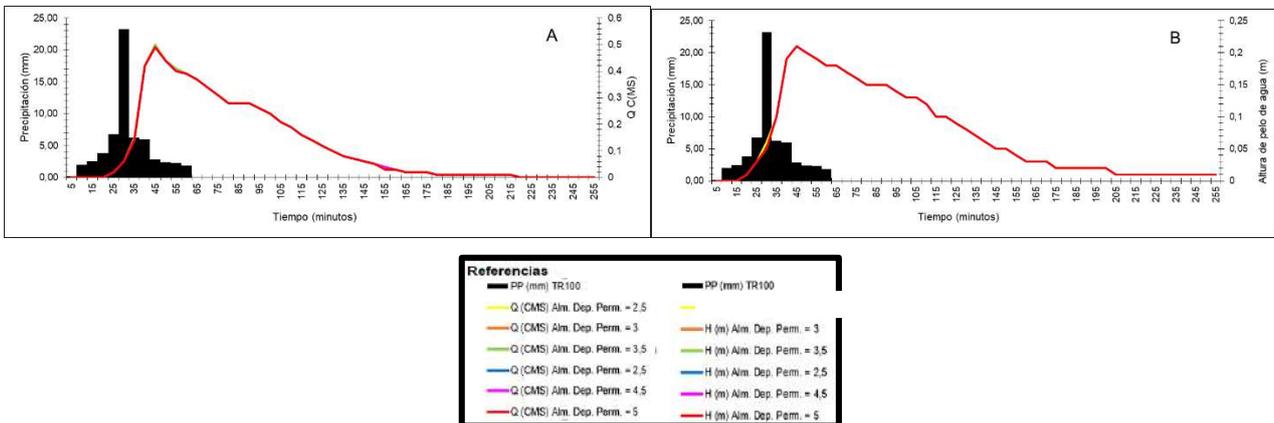


Figura 54. Comparación resultados de valores de Almacenamiento en depresión de áreas permeables en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m³/s) de la última calle del sistema SV2 (B) con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.

3.1.5.4.-Sensibilidad al Coeficiente de Descarga de sumideros.

El último parámetro con el que se le realizó un análisis de sensibilidad corresponde al coeficiente de descarga de los sumideros. Se muestran los resultados del caudal de salida (m³/s) de los sistemas menor y mayor y la altura de pelo de agua (m) de la última

calle del sistema SV2. Estos resultan de la simulación con tormentas de diseño con tiempo de recurrencia de 2 y 100 años.

El coeficiente de descarga resulta ser un valor sensible con un rango de valores de 1,38-2,1; aunque con precipitaciones de mayor intensidad esta sensibilidad se amortigua (Figuras 55 y 56). Por otro lado, a medida que se aumenta el valor del parámetro disminuyen las alturas de pelo de agua (m) en calle y los valores de caudales (m^3/s) correspondientes al sistema mayor. De manera inversa, al aumentar el valor del parámetro aumentan también los valores de caudales (m^3/s) de salida del sistema menor. Por lo cual, los sumideros captan más volumen de agua cuanto mayor sea el valor de coeficiente de descarga.

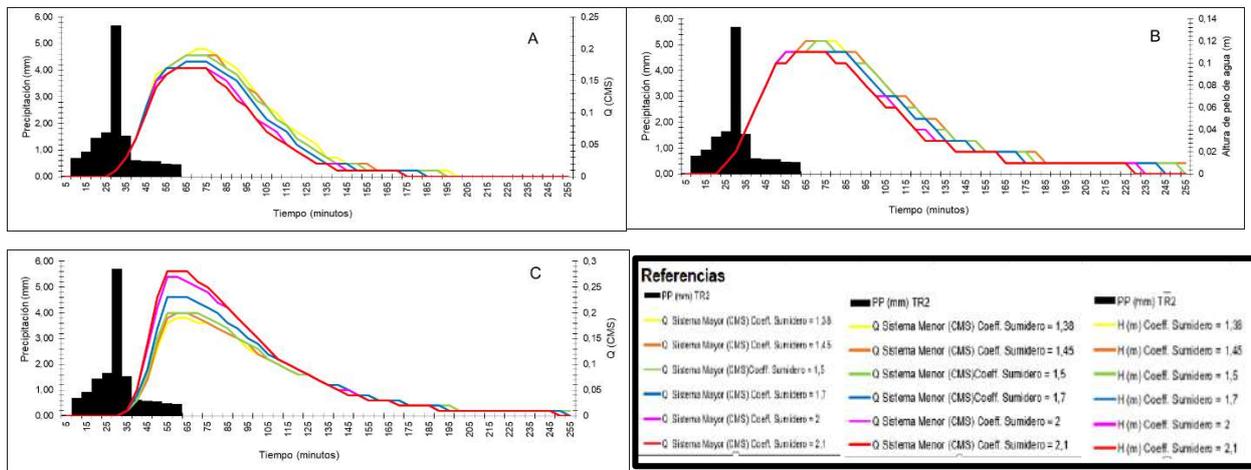


Figura 55. Comparación resultados de valores de Coeficiente de Descarga de sumideros en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m^3/s) de la última calle del sistema SV2 con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 2 años.

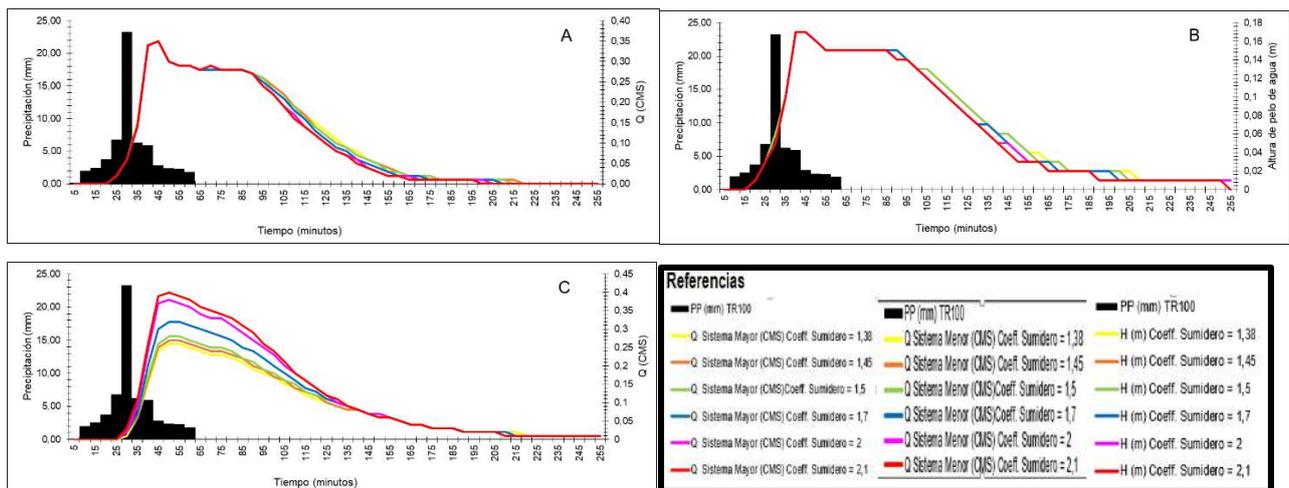


Figura 56. Comparación resultados de valores de Coeficiente de Descarga de sumideros en alturas de pelo de agua (A) y caudales (m^3/s) de la última calle del sistema SV2 con una precipitación de diseño para un tiempo de recurrencia de 100 años.

El comportamiento que presenta el modelo tras las diferentes precipitaciones concuerda con las conclusiones de varios autores que realizaron análisis de sensibilidad de diversos parámetros que fueron mencionados en esta tesis (eg. Warwick, *et al.* 1991; Jing, *et al.* 2019). Por otro lado, debido a que el modelo no tiene un set predeterminado de parámetros a calibrar, cada autor realiza los análisis de sensibilidad correspondientes a los parámetros elegidos (Knighton, *et al.* 2016), de esta manera, algunos parámetros resultan ser sensibles para algunos autores mientras que para otros no. Este es el caso del N de Manning de los conductos, donde en esta tesis resultó ser un parámetro no sensible, mientras que en otras investigaciones, resulta ser un parámetro sensible, como en Zaghloul (1983). De todas maneras, en varios trabajos se toma como valor de N válido los tabulados por Huber (1988) para el modelo (eg. James, 2001; Chow, *et al.* 2012; Rosa, 2014; Yu, *et al.* 2014; Sun, *et al.* 2014) o los propuestos por otros autores como Rossman (2009) quien es el autor del manual de SWMM. La mayoría de los trabajos que evalúa la sensibilidad del N de Manning de los conductos, utiliza rangos de valores grandes para la comparación y, en gran parte, son publicaciones previas a la parametrización para SWMM del año 1988.

El modelo resultó sensible a los parámetros N de Manning y almacenamiento en depresión, tanto para las áreas impermeables como para las permeables de las subcuencas, y en el coeficiente de descarga de los sumideros.

3.1.6.- Calibración y validación de parámetros sensibles en SV2.

Los valores resultantes de la calibración de los parámetros que resultaron sensibles se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores de N de Manning, almacenamiento en depresión para áreas permeables e impermeables de las subcuencas y coeficientes de descarga de sumideros que mejores resultados dieron en base a la comparación con datos observados para la cuenca urbana SV2, Villa Elvina, Santa Rosa, La Pampa.

Parámetros	N Manning de áreas impermeables de subcuencas	N Manning de áreas permeables de subcuencas	Almacenamiento en depresión de áreas impermeables de subcuencas	Almacenamiento en depresión de áreas permeables de subcuencas	Coeficiente de descarga de sumideros
Valores Calibrados	0,012	0,3	2	6	6

La validación de los parámetros calibrados en SV2 se realizó comparando los valores observados de altura de pelo de agua (m) con los simulados en los eventos de precipitación reales ya descritos (Figura 57).

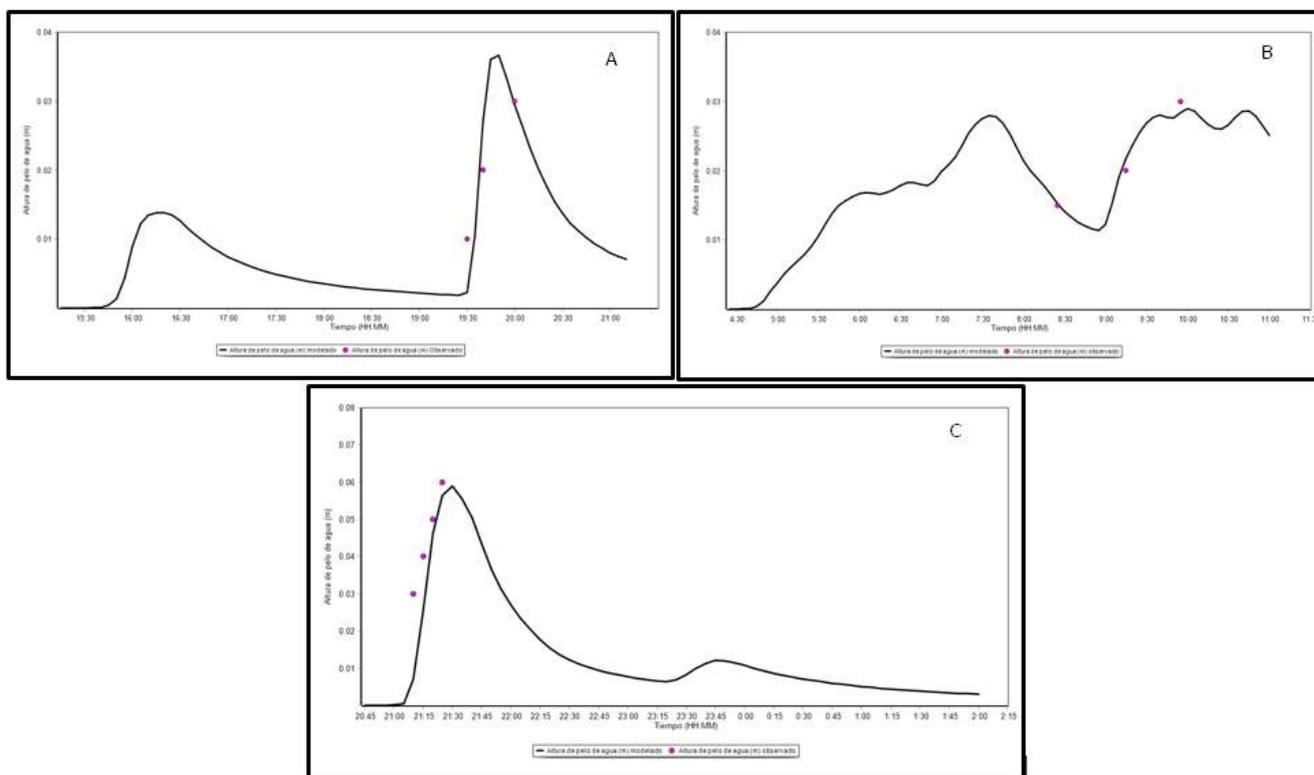


Figura 57. Altura de pelo de agua (m) simulada, en línea continua negra, y observada, en puntos magenta, para la subcuenca urbana SV2 en el barrio Villa Elvina con precipitaciones ocurridas en los días 7 de mayo (A), 27 de septiembre (B) y 4 de noviembre (C) del año 2018 de 8; 33,8 y 12,4 mm respectivamente en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

Al comparar los resultados obtenidos de la calibración con otros autores, los valores resultan coherentes. Kourtis, *et al.* (2017) realizaron la calibración del modelo para la ciudad de Atenas, Grecia, donde se obtienen resultados para los parámetros similares a los evaluados en esta tesina. Rosa, *et al.* (2015) calibraron el modelo SWMM en Long Island, Estados Unidos con valores de N de Manning y almacenamiento en depresión para áreas impermeables afín a los calculados en este trabajo. Bai, *et al.* (2018) los valores utilizados para evaluar la implementación de SDUS en la ciudad de Suqian, China, son similares a los propuestos en esta tesina. Niyonkuru (2019) realizaron una calibración para una subcuenca de Nyabugogo, Rwanda concluyendo valores conformes con los expuestos anteriormente para la ciudad de Santa Rosa.

3.1.7.- Discretización espacial de la subcuenca urbana SC en SWMM.

Se discretizó SC, donde se aplicó el modelo SWMM con la configuración de parámetros determinada a partir de la subcuenca piloto SV2. En la Figura 58 se puede observar que las manzanas se conforman de subcuencas, las calles se representan como subcuencas y como conductos abiertos (líneas verdes) conectados por nodos (puntos rojos en B). Se encuentra representado el sistema mayor del sistema que aporta agua al sistema pluvial o sistema menor conectado por medio de vertederos tipo sumidero representado con el símbolo ►◀. Debido a que en esta porción de la ciudad ambos sistemas (mayor y menor) terminan en la Laguna Don Tomás, sus salidas se representan con el mismo vertedero (triángulo rojo invertido en B).

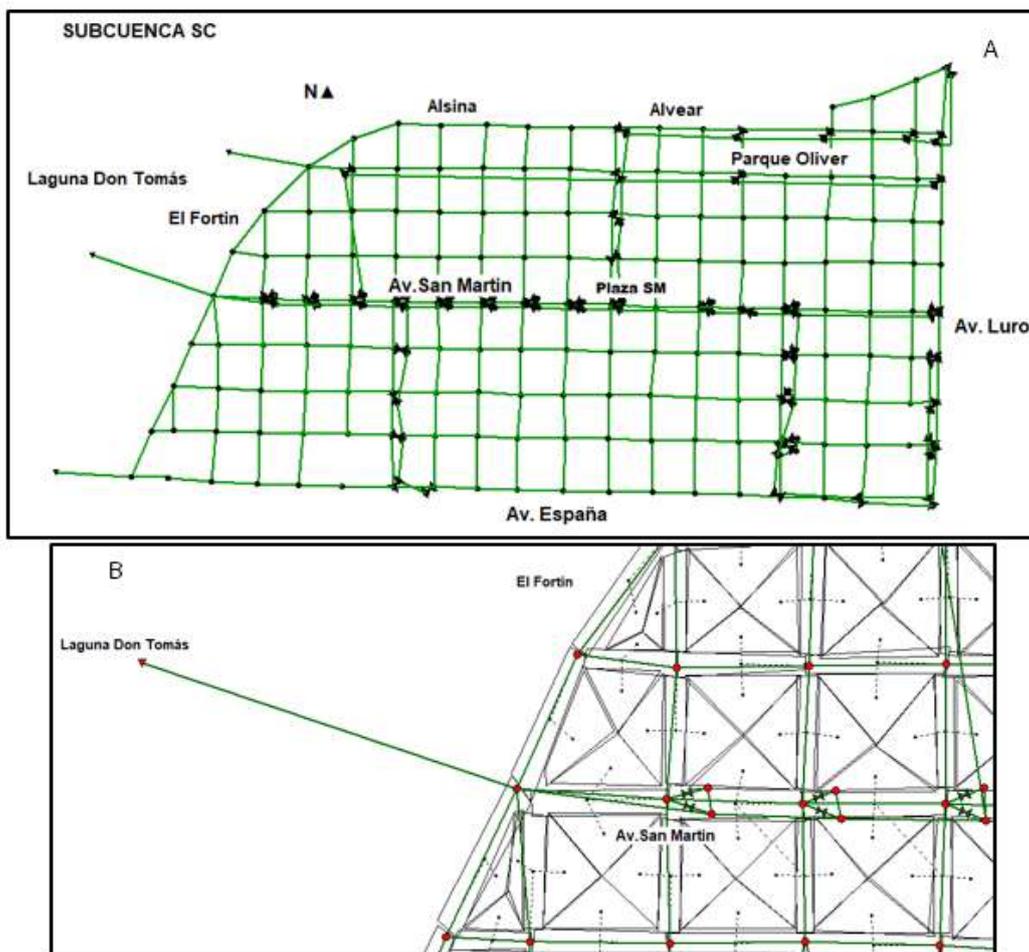


Figura 58. Esquema de conceptualización del modelo en subcuenca SC en escala reducida (A) y ampliada (B) constituida a partir del barrio Centro de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

La cuantificación de los objetos del modelo, es decir la cantidad de subcuencas, conductos, nodos, vertederos y sumideros se describen en la Tabla 20.

Tabla 20. Cuantificación de objetos constituidos en la subcuenca SC.

Subcuencas	Conductos	Nodos	Vertedero (Outfall)	Vertedero (Sumidero)
858	361	221	3	57

Los conductos fueron diseñados tomando en cuenta dos tipos de sección transversal, una utilizada para las calles en general (Figura 59 A) y otra para las avenidas que cuentan con estructura de boulevard (Figura 59 B).

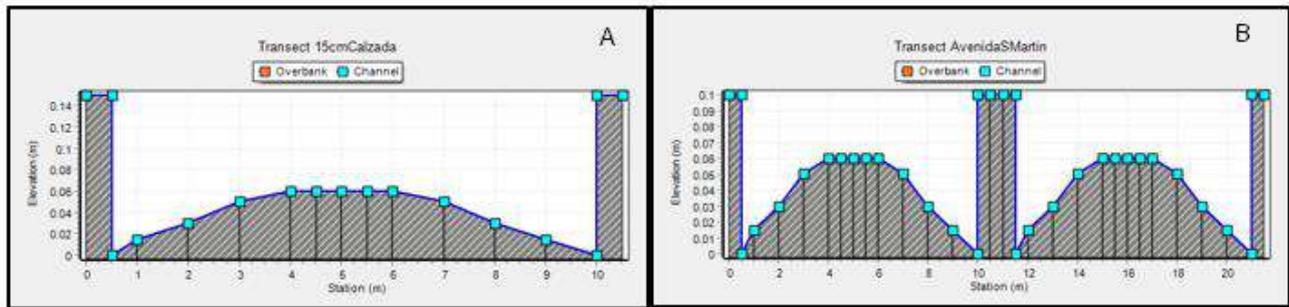


Figura 59. Esquema conceptual del modelo de sección transversal para las calles (A) y las avenidas con boulevards (B) de la subcuenca SC. En las ordenadas se encuentra la elevación (m) de la sección y en las abscisas la longitud perpendicular del conducto (m).

3.1.8.- Validación de valores calibrados en la subcuenca SC.

En la Figura 60, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para la cuenca SC a partir de la utilización de los parámetros calibrados y validados en la subcuenca urbana SV2. Se muestran las relaciones entre altura de pelo de agua (m) simulados y observados en cuatro eventos de precipitación en uno de los puntos finales de la subcuenca ubicado en la Avenida San Martín ocurridas los días 13 de noviembre (A), 8 de diciembre (B), 10 de diciembre (C) del año 2018 y 13 de febrero del 2019 (D) de 8,6; 11,4; 41 y 4,4 mm respectivamente. Con precipitaciones de diferentes volúmenes totales que van desde los 4,4 mm a los 41 mm, los parámetros calibrados para la cuenca SV2 son válidos para utilizar en la cuenca SC.

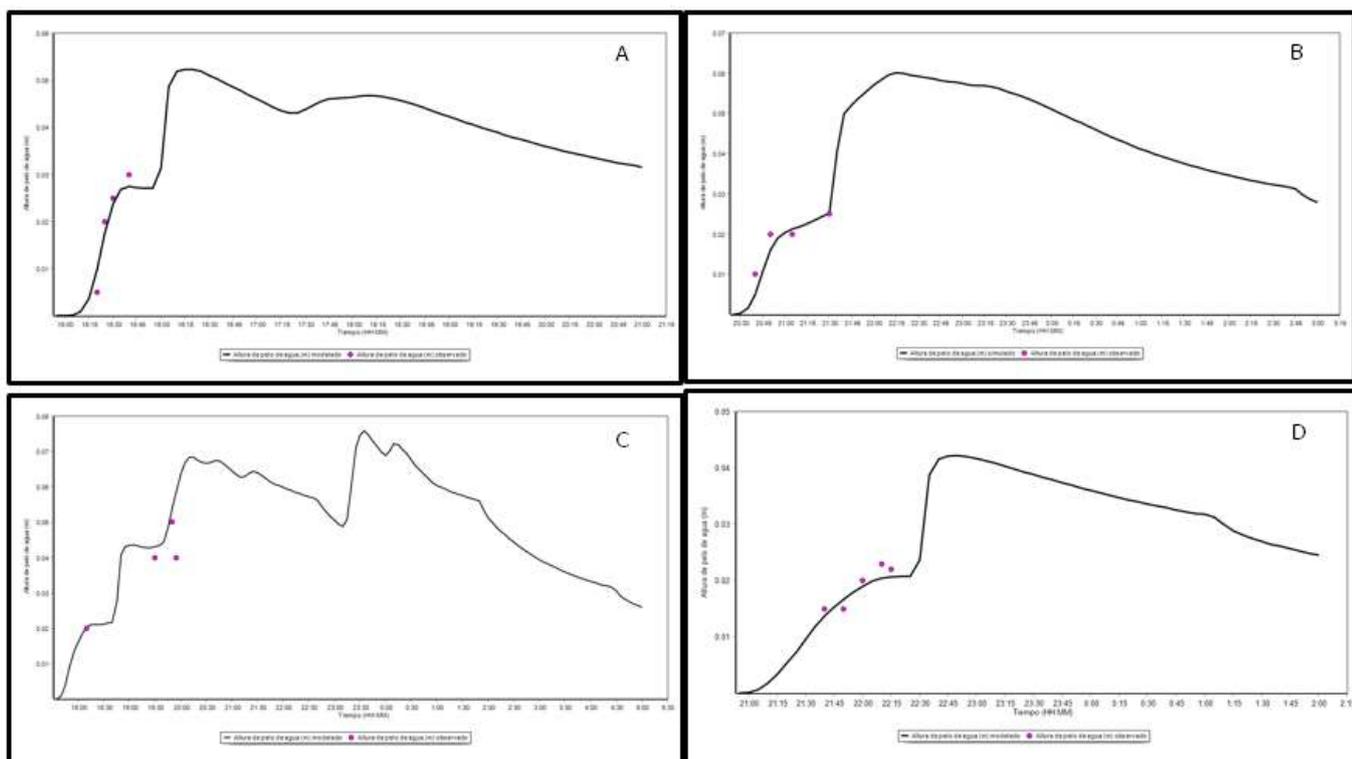


Figura 60. Altura de pelo de agua (m) modelado, en línea continua negra, y observado, en puntos magenta, para la subcuenca urbana SC en el barrio Centro, Santa Rosa, La Pampa.

3.1.9.- Evaluación de Respuesta Hidrológica en la ciudad.

En la Figura 61 se muestran precipitaciones con tiempo de recurrencia bajos, de 2 y 5 años, donde los picos de los hidrogramas son mayores para la calle Sarmiento y Avenida Uruguay, representados con líneas azul y verde respectivamente. Mientras que, con tiempos de recurrencia mayores a 10 años el hidrograma con mayor caudal pertenece siempre a la Avenida San Martín, representado con línea roja. Por otro lado, los tiempos al pico para esta última son más cortos en precipitaciones de tiempo de recurrencia de menos de 10 años con valores de 50 minutos en contraste con la calle Sarmiento y Avenida Uruguay con tiempos al pico de 1:20 a 1:35 horas. Sin embargo, con precipitaciones de mayor magnitud, los tiempos al pico se emparejan para las tres salidas, como es el caso de la tormenta de 100 años donde el tiempo se encuentra en el rango de los 50 a 65 minutos para todas las salidas del sistema.

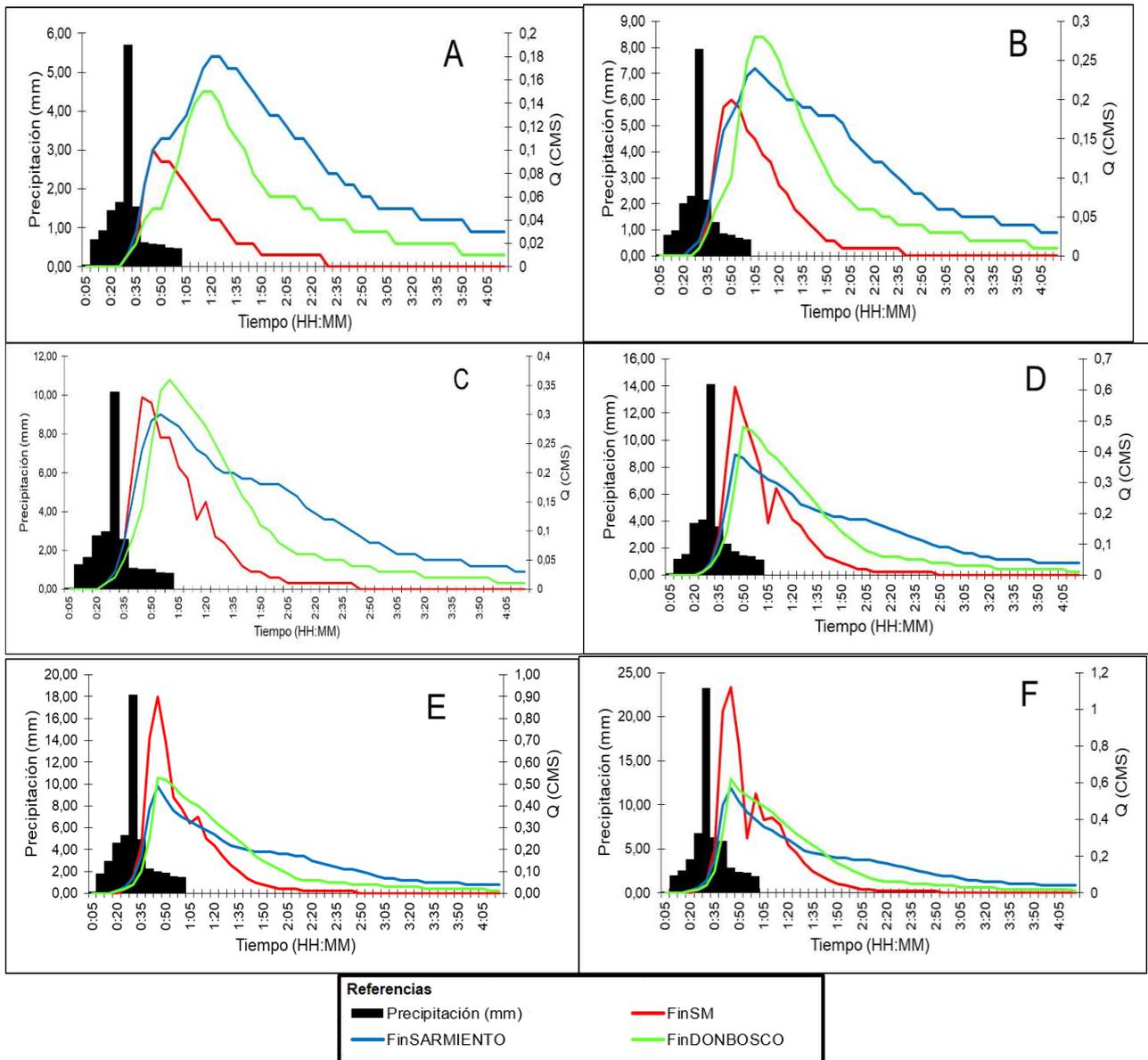


Figura 61. Hidrogramas de salidas de subcuenca SC por calles Sarmiento (línea azul), Avenida Uruguay (línea verde) y Avenida San Martín (línea roja) para tormentas de diseño de tiempo de recurrencia de 2 (A), 5 (B), 10 (C), 25 (D), 50 (E) y 100 (F) años.

En la Tabla 21 se observa que con precipitaciones de tiempos de recurrencia de hasta 25 años, los mayores volúmenes de escorrentía superficial son aportados por la calle Sarmiento con hasta 2061 m³. Los menores volúmenes de escorrentía corresponden a la Avenida San Martín con hasta 756m³ con tormentas de hasta 5 años de tiempo de recurrencia. La Avenida Uruguay presenta volúmenes de escorrentía más altos, en comparación con las otras dos salidas.

Tabla 21. Volúmenes de escorrentía superficial (m3) para tres salidas del sistema SC por la calle Sarmiento, Avenida Uruguay y San Martín para tormentas de diseño de tiempos de recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Salida del sistema	Tiempo de recurrencia de precipitación (años)					
	2	5	10	25	50	100
	Volúmen de escorrentía (m ³)					
Av. San Martín	432	756	1425	2046	2586	3150
Sarmiento	1200	1578	1800	2061	2238	2424
Av. Uruguay	714	1140	1386	1752	1947	2145

3.1.10.- Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible en diferentes escenarios y eventos.

Se muestran los resultados obtenidos tras simular diferentes escenarios sin y con SDUS con las cisternas diseñadas y el análisis de los escenarios.

Las cisternas se dividieron según si captan agua de lluvia de los techos de los edificios o si captan agua de lluvia convertida en escorrentía superficial en espacios verdes. La superficie de captación propuesta para los edificios fue de 65m² y para los techos el valor de coeficiente de escorrentía es de 0,75. Siendo entonces,

$$VT_{\text{cisternas edificios}} = 65m^2 * 0,75 * 683,35mm \quad \text{Ecuación 31. Volumen total cisternas de edificios}$$

$$VT_{\text{cisternas edificios}} = 33313,31 \text{ litros} = 33 m^3$$

Con estos volúmenes se definieron las medidas de las cisternas cilíndricas:

$$h_{\text{cisterna edificios}} = \frac{31m^3}{2\pi*(1,5m)^2} = 2m \quad \text{Ecuación 32. Altura de cisternas para edificios.}$$

Para los espacios verdes, las cisternas colocadas en la plaza San Martín y en el parque Oliver fueron de 50 m³ de volumen con 2 m de profundidad. Este volumen se calculó considerando que el área impermeable de ambos lugares ronda en el 40% del área total y que, para una precipitación tipo de 2 años de tiempo de recurrencia, el almacenamiento es factible.

Para la confección de los gráficos correspondientes a los caudales de salida (m³/s) de los tres vertederos *outfall* finales del sistema, la calle Sarmiento y las avenidas San Martín y Uruguay, se utilizó como función de entrada las tormentas de diseño de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de recurrencia para cada escenario. Cada escenario fue representado con un color, los escenarios sin SDUS (1) en línea naranja, con SDUS exclusivamente en edificios existentes actualmente (2) en línea amarilla, en edificios en construcción en el año

2019 (3) en línea azul, en espacios verdes existentes (4) en línea verde, la combinación de SDUS en edificios existentes y espacios verdes (5) en líneas magenta, en edificios en construcción y espacios verdes (6) en violeta, en edificios existentes y en construcción (7) en línea gris y el escenario que combina las tres estructuras en conjunto (8) en línea roja.

Se observa en los gráficos, cuando se implementa la utilización de SDUS por medio de cosecha de agua y con precipitaciones de tiempo de recurrencia pequeños, se modifica el caudal de salida de la cuenca cuando se implementa (Figura 62 y 63). Cuando las precipitaciones tienen magnitudes elevadas el efecto se ve amortiguado (Figura 64, 65, 66 y 67). Jia, *et al.* (2014) concluyen que para Suzhou, China, la implementación de diferentes tipos de SDUS distribuidos en la ciudad tienen un impacto positivo con precipitaciones con tiempos de recurrencia de hasta 5 años aunque se considera que esta comparación no registra si las tormentas de diseño son similares o no a las propuestas para el caso de estudio, la asimilación resulta válida debido a que los sistemas que proponen en su trabajo están dimensionados acorde a las tormentas locales, al igual que las propuestas en este caso.

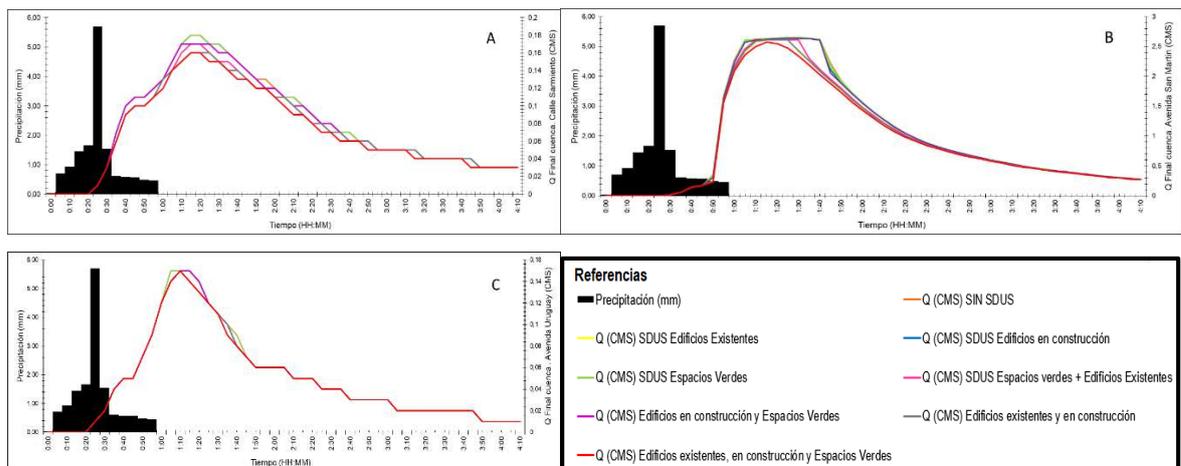


Figura 62. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m³/s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 2 años.

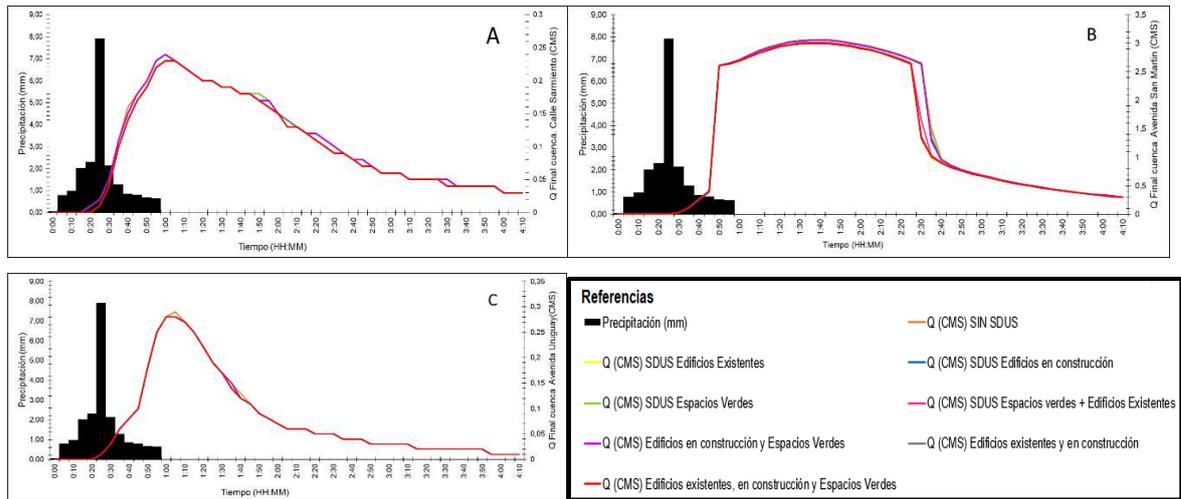


Figura 63. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m³/s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 5 años.

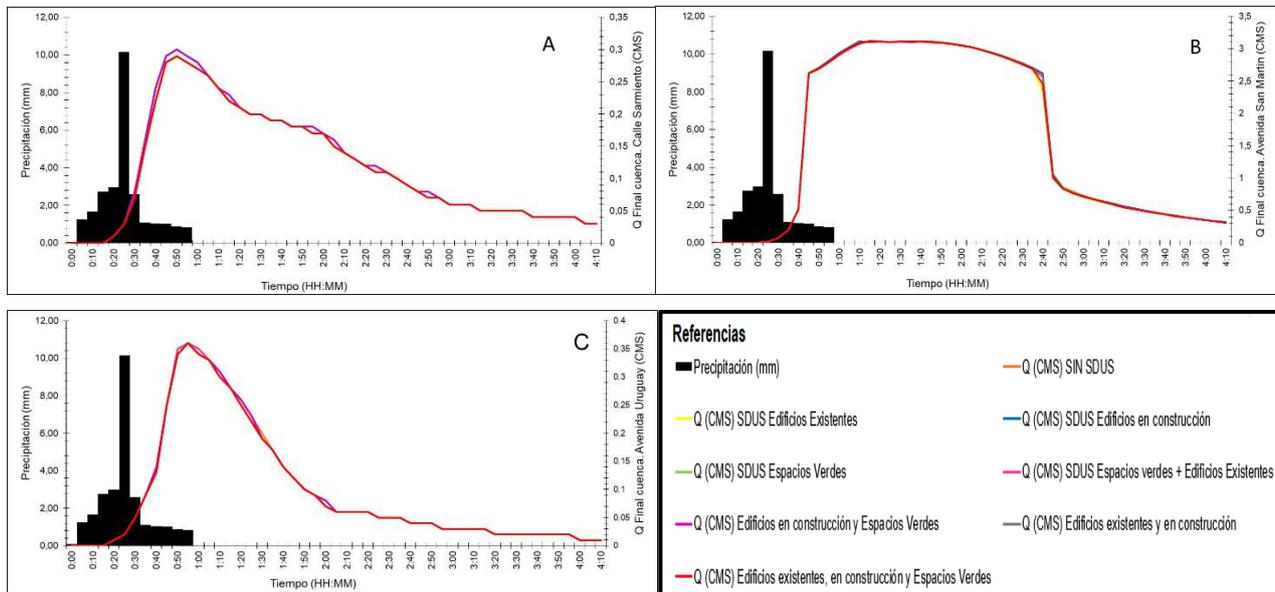


Figura 64. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m³/s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 10 años.

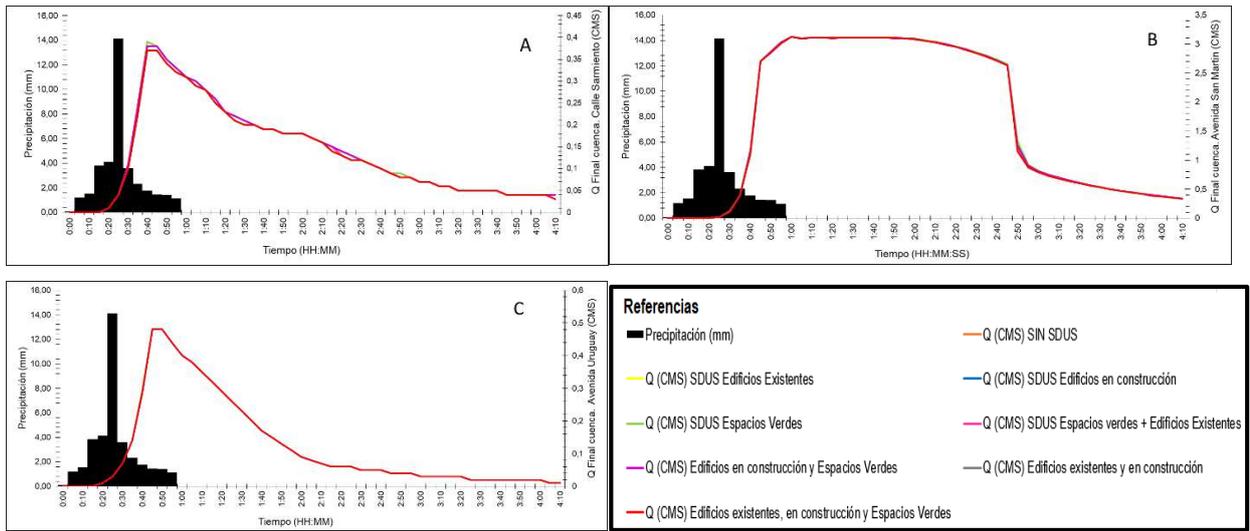


Figura 65. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m³/s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 25 años.

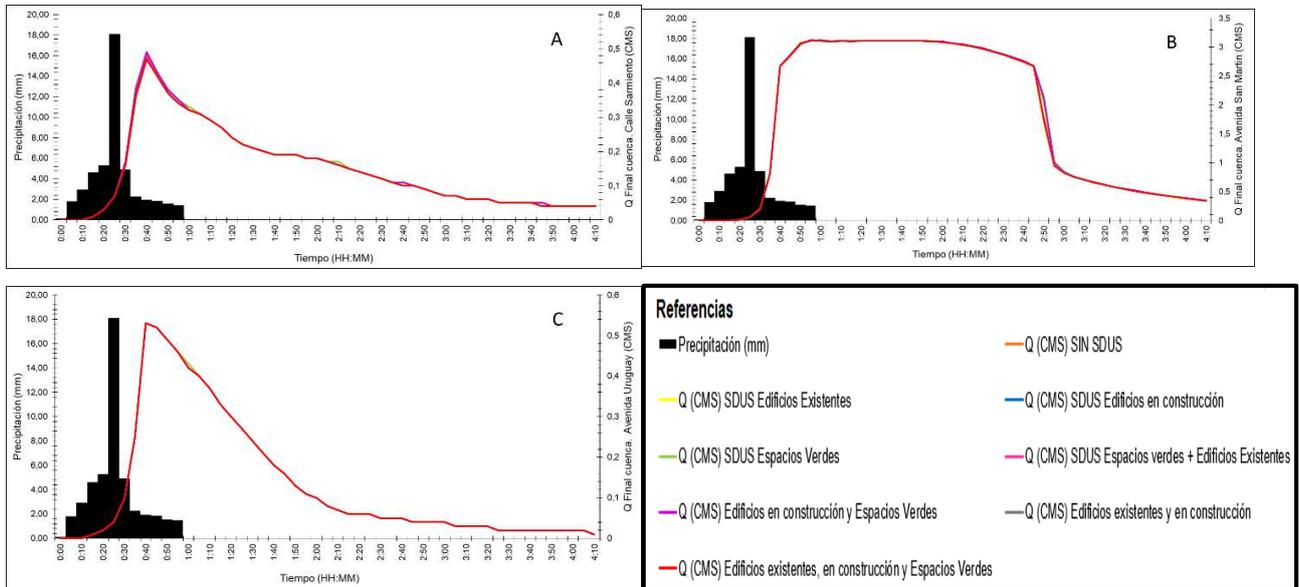


Figura 66. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m³/s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 50 años.

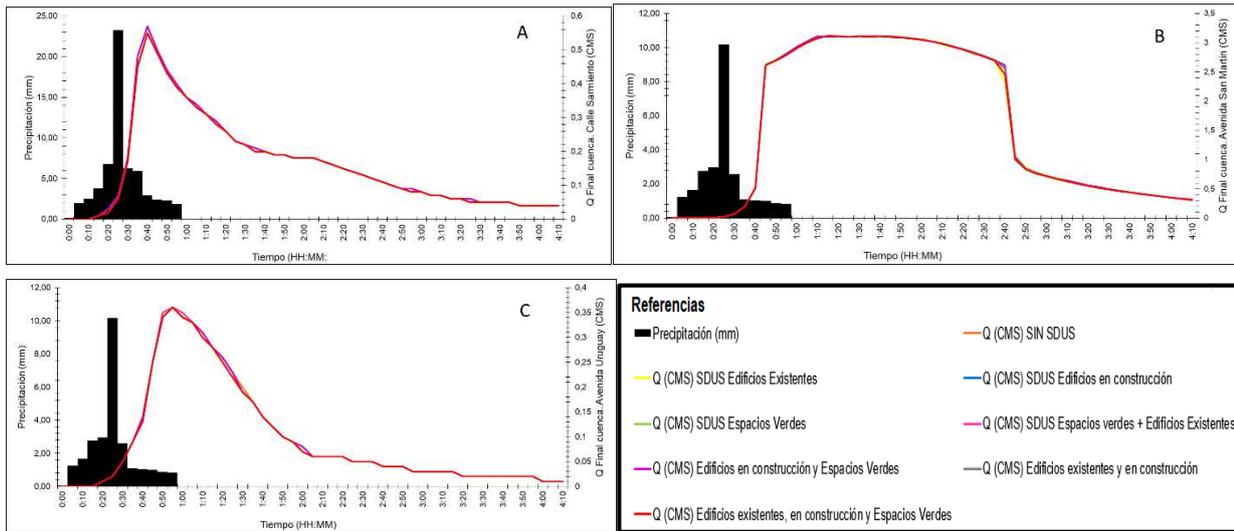


Figura 67. Hietograma (mm) e hidrograma de caudales de salida (m³/s) de la cuenca por la calle Sarmiento (A), Avenidas San Martín (B) y Uruguay (C) con diferentes escenarios para una tormenta de tiempo de recurrencia de 100 años.

Los escenarios que cuentan con mayor cantidad de cisternas, es decir, aquellos que consideran los edificios existentes en la ciudad de Santa Rosa, presentan un impacto mayor en el amortiguamiento de los caudales, de hasta 6% de disminución en el caudal pico (Tabla 22).

Tabla 22. Comparación porcentual de escorrentía pico (m³/s) simulado para el escenario sin SDUS con respecto a los demás escenarios planteados para diferentes eventos.

TR (año)	Escorrentía pico (m ³ /s) y comparación porcentual con respecto a Sin SDUS para escenarios							
	Sin SDUS	Edificios existentes (1)	Edificios en construcción (2)	Espacios verdes (3)	(1)+(2)	(1)+(3)	(2)+(3)	(1)+(2)+(3)
2	2,95	2,92(3%)	2,95(0%)	2,95(0%)	2,91(4%)	2,92(3%)	2,94(1%)	2,91(4%)
5	3,42	3,37(5%)	3,41(1%)	3,42(0%)	3,36(6%)	3,37(5%)	3,41(1%)	3,36(6%)
10	3,66	3,63(3%)	3,65(1%)	3,66(0%)	3,62(4%)	3,63(3%)	3,65(1%)	3,62(4%)
25	3,85	3,84(1%)	3,84(1%)	3,85(0%)	3,84(1%)	3,84(1%)	3,84(1%)	3,84(1%)
50	3,94	3,92(2%)	3,94(0%)	3,94(0%)	3,91(3%)	3,92(2%)	3,93(1%)	3,91(3%)
100	4,12	4,11(1%)	4,12(0%)	4,12(0%)	4,1(2%)	4,11(1%)	4,12(0%)	4,1(2%)

Varios autores plantean la combinación de distintos tipos de sistemas de drenaje urbano sostenible, como techos verdes, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, entre otros, para aprovechar sus características de manera holística (eg. Bosley y Kern, 2008; Tillinghast, *et al.* 2012; Chaosakul, *et al.* 2013; McCutcheon, *et al.* 2013; Bai, *et al.* 2018). Taji y Rewulgar (2019) presenta la implementación de diferentes tipos de SDUS conformados en diferentes escenarios, siendo el escenario III igual al propuesto en esta

tesina, es decir la implementación de cisternas para cosecha de agua. Cuando los autores presentan el porcentaje de disminución de caudal pico los valores para este escenario son similares a los presentados en este trabajo (6,50%). Mientras que, cuando combinan distintos tipos de SDUS este porcentaje aumenta (26%).

3.2.- Balance Hídrico

El balance hídrico de la ciudad se realizó para tormentas con tiempos de recurrencia de 2 y 5 años para los escenarios SIN SDUS, SDUS en espacios verdes y edificios en construcción y SDUS en edificios en construcción, espacios verdes y edificios existentes.

La Tabla 23 y la Figura 68, muestran que con la implementación de cisternas, para precipitaciones de tiempo de recurrencia de 2 y 5 años, el volumen de salida de la cuenca urbana disminuye hasta un 7% y hasta un 4% respectivamente.

Tabla 23. Balance hídrico para la subcuenca SC considerando eventos de precipitación con tiempos de recurrencia de 2 y 5 años para los escenarios planteados como SIN SDUS, SDUS en espacios verdes y edificios en construcción y SDUS en espacios verdes, edificios en construcción y existentes. El volumen precipitado sobre la cuenca representa el 100% del agua del sistema, el volumen de salida es la sumatoria de todos los volúmenes de las tres salidas del sistema por las calles Sarmiento, Don Bosco y Avenida San Martín.

Evento	Escenario	Volumen Precipitado en cuenca SC (m ³)	Sumatoria de volumen de salida en cuenca SC (m ³)	Variación de almacenamiento ΔS (m ³)
TR=2 años	SIN SDUS	26923,55 (100%)	17427 (64,73%)	9496,55 (35,27%)
	SDUS en espacios verdes y edificios en construcción		16850 (62,58%)	10073,56 (37,42%)
	SDUS en espacios verdes, edificios existentes y en construcción		15621 (58,02%)	11302,56 (41,98%)
TR= 5 años	SIN SDUS	37437,43 (100 %)	24854 (66,39%)	12583,43 (33,61%)
	SDUS en espacios verdes y edificios en construcción		24600 (65,71%)	12837,43 (34,29%)
	SDUS en espacios verdes, edificios existentes y en construcción		23275 (62,17%)	14162,43 (37,83%)

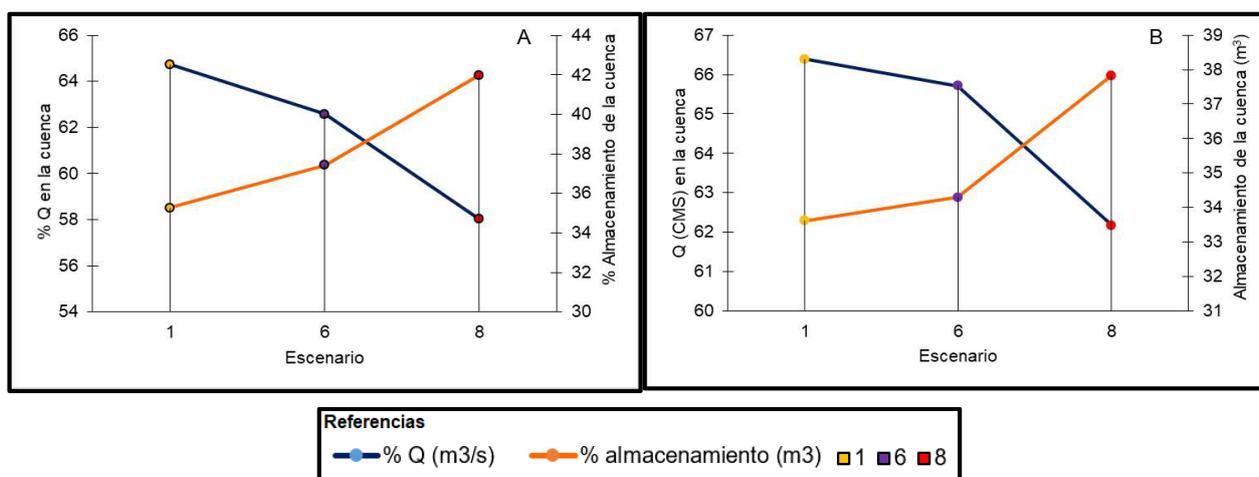


Figura 68. Comparación entre el porcentaje de escorrentía en la salida de la cuenca y el porcentaje de almacenamiento de la cuenca resultante del balance hídrico para los escenarios SIN SDUS (1), con SDUS en espacios verdes y edificios en construcción (6) y SDUS en espacios verdes, edificios en construcción y existentes (8) con tormentas de diseño de 2 (A) y 5 (B) años para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

Esta disminución de la esorrentía conlleva a un aumento del almacenamiento de la cuenca reflejado en la retención de las cisternas. Esta última siempre es mayor con mayor cantidad de cisternas (Figura 69).

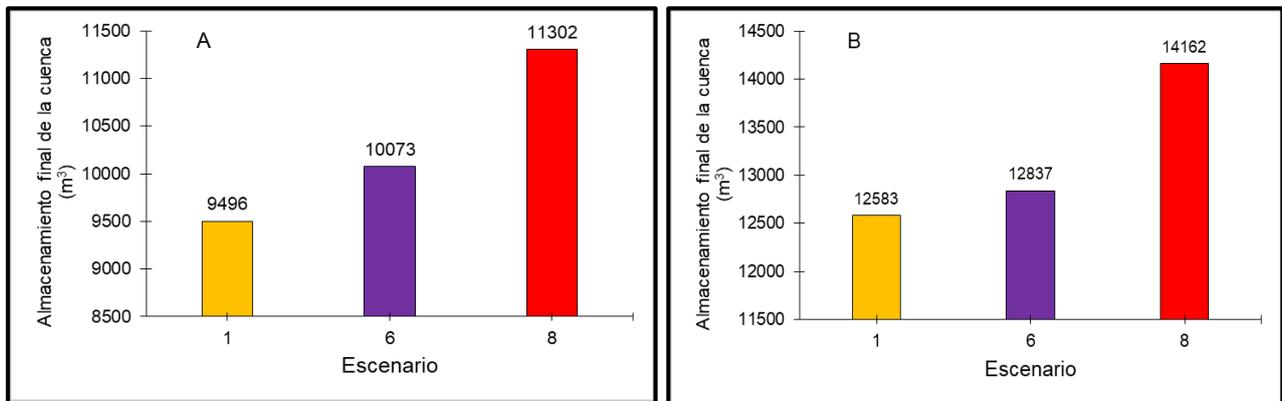


Figura 69. Almacenamiento final (m³) de la cuenca resultante del balance hídrico para los escenarios SIN SDUS (1), con SDUS en espacios verdes y edificios en construcción (6) y SDUS en espacios verdes, edificios en construcción y existentes (8) con tormentas de diseño de 2 (A) y 5 (B) años de recurrencia para la ciudad de Santa Rosa, La Pampa.

4. Conclusiones y Recomendaciones

En esta tesina se evaluó la respuesta hidrológica de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa y la posibilidad de implementar Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible por medio de cosecha de agua en cisternas. Se realizó el balance hídrico de la ciudad con ayuda de la modelación hidrológica-hidráulica con el modelo SWMM 5.1 en una cuenca del centro de la ciudad en diferentes escenarios según eventos de precipitación.

- La respuesta hidrológica de la ciudad para el barrio centro manifestó que sus tres salidas, con precipitaciones con tiempo de recurrencia bajos, presentan picos de hidrogramas mayores para la calle Sarmiento y Avenida Uruguay. Mientras que, con tiempos de recurrencia mayores a 10 años, el hidrograma con mayor caudal se presenta siempre en la Avenida San Martín. Por otro lado, los tiempos al pico para esta última son más cortos en precipitaciones de tiempo de recurrencia de menos a 10 años con valores de 50 minutos en contraste con la calle Sarmiento y Avenida Uruguay con tiempos al pico de 1:20 a 1:35 horas. Sin embargo, con precipitaciones de mayor magnitud, los tiempos al pico se emparejan para las tres salidas, como es el caso para la tormenta de 100 años donde el tiempo se encuentra en el rango de los 50 minutos a 1:05 horas para todas las salidas del sistema. Además, con precipitaciones de tiempos de recurrencia de hasta 25 años, los mayores volúmenes de escorrentía superficial son aportados por la calle Sarmiento con hasta 2061 m³. Mientras que, los menores volúmenes de escorrentía, para tormentas de hasta 5 años de tiempo de recurrencia son los de la Avenida San Martín con hasta 756 m³. Esta última, presenta el Sistema Menor, más denso con mayor proporción de bocas de tormenta a lo largo de toda su extensión en comparación con las otras dos calles evaluadas. Esto puede explicar su variación de los volúmenes de escorrentía superficial y comportamiento del hidrograma, siendo que cuando el sistema de drenaje no puede recibir más aportes los volúmenes de escorrentía superficial y el pico del hidrograma aumenta. Además, en esta avenida el tiempo al pico y el tiempo base son menores por la rápida respuesta del sistema pluvial. Por otro lado, la calle Sarmiento y la Avenida Uruguay poseen una red menos densa de bocas de tormenta y, por tanto, los volúmenes de escorrentía superficial son mayores con un tiempo de respuesta menor del hidrograma. Otros factores que pueden afectar la respuesta hidrológica son las bajas pendientes en algunas partes del sistema que pueden generar encharcamiento y/o disminución en la velocidad del flujo y la permeabilidad y/o absorción en las cuencas por presencia de parques o plazas.

- La utilización de SDUS con cosecha de agua disminuye el caudal de salida de la cuenca cuando se implementa, pero, cuando las precipitaciones tienen magnitudes elevadas con tiempos de recurrencia de más de 5 años los efectos se ven amortiguados. Además, los escenarios que cuentan con mayor cantidad de cisternas en edificios presentan un impacto mayor en el amortiguamiento de los caudales, de hasta 6% de disminución en el caudal pico. Esto se debe a que cuanto mayor superficie de la ciudad se encuentre a disposición como superficie de captación de las cisternas, mayor almacenamiento se obtendrá. Pese a que las plazas y parques no representan un problema a la generación de escorrentía, suponen un área de captación en sus áreas impermeables que puede ser aprovechada para colección de agua. Por otro lado, en la ciudad de Santa Rosa, particularmente en el área de estudio, tanto la plaza San Martín como el parque Oliver se encuentran cercanos a bocas de tormenta, por lo tanto, el almacenamiento para disminución de caudales se ve como una complementación al Sistema Menor. Además, se considera que es de suma importancia el valor del agua de lluvia retenida y almacenada para tareas de mantenimiento de estos espacios verdes, como riego y limpieza.
- El balance hídrico de la ciudad se realizó para tormentas con tiempos de recurrencia de 2 y 5 años para los escenarios SIN SDUS, SDUS en espacios verdes y edificios en construcción y SDUS en edificios en construcción, espacios verdes y edificios existentes. Se obtuvo que con la implementación de cisternas el volumen de salida de la cuenca urbana disminuye hasta un 7% para precipitaciones de tiempos de recurrencia de 2 años y hasta un 4% para precipitaciones con tiempos de recurrencia de 5 años. Además, esta disminución en los caudales es mayor con mayor cantidad de unidades de almacenamiento implementadas. Esto concuerda con lo expuesto anteriormente y la relación directa entre la cantidad de unidades y la cantidad de almacenamiento por área de captación. También cabe reiterar que, pese a que los efectos de disminución de caudal no son elevados para eventos de gran magnitud, la utilización no consuntiva, es decir riego, limpieza, entre otros, de agua de lluvia retenida en cisternas es posible.

En general, se concluye que la modelación hidrológica con SWMM es una herramienta útil y efectiva para evaluar la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible y que la utilización de cisternas para retención y almacenamiento de agua posee un gran potencial de uso pero, si no se complementa con otros tipos

de SDUS, como techos verdes, cunetas verdes, depósitos de detención en superficie entre otros, el impacto en la disminución de escorrentía en calle no es elevado.

En función de las conclusiones obtenidas, se recomienda:

- Realizar investigaciones científicas que evalúen la respuesta hidrológica de la ciudad de Santa Rosa con distintos tipos de SDUS de maneras combinadas para diferentes eventos y escenarios.
- Realizar investigaciones científicas que evalúen la calidad del agua almacenada en las cisternas para poder determinar de manera concreta los tipos de usos que pueden implementarse.
- Plantear como medida de uso y aprovechamiento de agua de lluvia la implementación de cisternas en los edificios que se vayan a construir en la ciudad y en espacios verdes como parte del Plan Estratégico de Santa Rosa.

5. Bibliografía

- Abellan García, I. (2013). *Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible: Aplicación práctica a tramo de la Diagonal de Barcelona*. Valencia.
- Abruña, F. (2008). Cosecha de agua de lluvia y su potencial en edificios verdes. *Revista Ambiental Corriente Verde*, 5(3), 37-39.
- Akinyemi, E. (2008). *International Experiences with Low Impact Development (LID). Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection*. International Low Impact Development Conference, (págs. 16-19). Seattle, Washington. EEUU. doi:10.1061/41009(333)66
- American Society of Civil Engineers. (ASCE) (1982). *American Society of Civil Engineers. ASCE Combined Index*. Estados Unidos: ISBN: 0872623505, 9780872623507.
- Apacio Mijares, J. F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. D.F., México: Limusa S.A. ISBN: 968-18-3014-8.
- Aranda, D. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. Printego.
- Arce, G.. (2011). La actividad humana y su impacto sobre los sistemas de drenaje urbanos. Estudio de caso: los desagües pluviales de la ciudad de Corrientes. *Revista Geográfica Digital IGUNNE*, 8(16). Recuperado el marzo de 2019, de <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm>
- Arregui Henk, L. J. (2016). *El futuro de los techos verdes en la ciudad de Buenos Aires*. Tesis de grado de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina.
- Bai, Y.; N., Zhao; R., Zeng y X.. (2018). Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas based on SWMM. *Water Journal*, 11(33). doi:10.3390/w11010033
- Balditarra, M. (2017). *Contribución al estudio de la evolución temporal del nivel freático*. Tesis de grado para Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad Nacional de La Pampa.
- Barnsley, M. J. (2007). *Environmental Modeling: a practical introduction*. 432. Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781315275970>
- Barrios Acuña, F. M.; S.C., Alonso; R.M., Vargas y F.A., Carvalho. (2014). *Alternativas para la gestión del agua de lluvia en el Campus de la Universidad Católica "Nuestra Señora de La Asunción" sede Santa Librada*. Enfoque de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Asunción, Paraguay: Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción.

- Benassi, A. H. (2012). El paisaje de la cultura, fundamentos ecológicos en el diseño paisajista. Tesis de postgrado. La Plata, Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata.
- Bennis, S. y E., Crodebbu. (2007). New runoff simulation model for small urban catchments. *Journal of Hydrology Engineering*, 12, 540-544.
- Berthier, E.; S., Dupont; P., Mestayer y H., Andrieu. (2006). Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *Journal of Hydrology*, 328(3-4), 635-646. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.01.007
- Beven, K. J. (1996). A discussion of distributed modelling. *Distributed hydrological modelling*. Kluwer, 255-278.
- Beven, K. J. (2000). *Rainfall-runoff modelling. The Primer*.
- Beven, K. J. (2002). Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological Processes*, 16, 189-206. doi:10.1002/hyp.343
- Bosley, I. I. y E., Kern. (2008). Hydrologic evaluation of Low Impact Development using a continuous spatially-distributed model. Tesis doctoral. Virginia Tech.
- Brière, F. G. y H., Pizarro. (2005). Distribución de agua potable y colecta de desagües y de agua de lluvia. Presses inter Polytechnique. ISBN: 2553011474, 9782553011474.
- Brighenti, T.; N., Chaffe y P., Bonumá. (2014). Urban floods: Models used in Brazil. 6th International Conference on Flood Management (ICFM6). San Pablo.
- Browne, J. (2015). Desarrollo de un techo vivo con especies nativas del Monte, restitución de superficie natural en la trama urbana de zonas áridas Norpatagónicas. Tesis de grado de Licenciatura en Saneamiento y Protección Animal. Neuquen, Argentina: Facultad de Ciencias del Ambiente y Salud. Universidad Nacional del Comahue.
- Burgos, V. H. (2007). Desarrollo Urbano de Bajo Impacto Hidrológico (DUBI). Pautas hacia una cultura hidrológica en Mendoza. IV Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Rosario, Argentina.
- Camilletti, C. M., Ma.G. Dalmaso y J. Tullio. (2018). Diagnóstico preliminar del ascenso freático en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa, Argentina. En García, R, E. Castro, O. Tujch, V. Rocha Fasola, M. Rangel Medina, R. Hirata, M. París y A. Manganelli (Eds.): *Acuíferos fronterizos, el agua subterránea y las ciudades, planificación y gestión*, 103-111, Universidad Nacional de Salta, Salta (ISBN 978-987-633-535-5).

- Campisano, A.; D., Butler; S., Ward; M.J., Burns; E., Friedler, E., et al. (2017). Urban rain-water harvesting systems research, implementation and future perspectives. *Water research*, 115, 195-209. doi:10.1016/j.watres.2017.02.056
- Cano, E. (1980). *Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa*. Buenos Aires: Universidad Nacional de La Pampa, Gobierno de la provincia de La Pampa e INTA.
- Carner, J. L.; S.O., Liscia; F., Ortiz; F., Lacava; E., Lacunza; et al. (2016). Capítulo 2: Inundación urbana de la ciudad de La Plata en abril de 2013, riesgo hídrico por inundación–mapas de peligrosidad. En A. Ronco, *Proyecto de Investigación Orientado (PIO). CONICET-UNLP (2014-2016). Las inundaciones en La Plata, Berisso y Ensenada. Analisis de riesgo, estrategias de intervención. Hacia la construcción de un observatorio ambiental. Facultad de Ingeniería, Unidad de Investigación, desarrollo, extensión y transferencia gestión ambiental. Universidad Nacional de La Plata.*
- Cavalie, C. (1979). *Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea potable a la ciudad de Santa Rosa. Acuíferos Santa Rosa-Anguíl, Santa Rosa-Toay*. Santa Rosa: Ministerio de Obras Públicas. Administración Provincial del Agua.
- Caviglia, J.; H.O., Lemes y J., Lorda. (2010). Caracterización de las unidades de producción agropecuarias en la provincia de La Pampa. *Boletín de Divulgación Técnica*, 99.
- Chaosakul, T.; T. Koottatep y K., Irvine (2013). Application of Low Impact Development (LID) scenarios to assess localized flood reduction. A case study of Rattanakosin Village, Thailand. *Pragmatic Modelling of Urban Water Systems*, 21, 337-353.
- Chow, M. F.; Z., Toriman y M., Yasuop, M. (2012). Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9(4), 737-748. doi:10.1007/s13762-012-0092-0
- Chow, V. T.; D.R., Mays, D. R. y L., Maidment. (2000). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana. ISBN: 9586001717.
- Cisneros, J.; A., Degioanni; A., Diez; A., Bergesio; et al. (2012). Inundación, anegamiento y erosión de tierras en sureste de Córdoba. Ciclo Octubre 2012-Junio 2013. *Informe técnico de coyuntura, Sitio Argentino de Producción Animal. Servicio de Conservación y Ordenamiento de Tierras*. ISSN: 0717-5051.
- Columbia County (CC). (2009). *Stormwater Management Design Manual*. Georgia. Estados Unidos.

- Concha Jopia, J. L. (2007). Introducción a EPA SWMM 5.0. En FLUMEN, Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0 (págs. 13-44). Cataluña, España.
- Consultoría Oscar Grimaux, y Estudio de Ingeniería Hidráulica S.A. (1986). Estudio para el saneamiento y control de niveles de la Laguna Don Tomás y el desarrollo integral de su área de influencia. Etapa I, Volumen I y II; Etapa II, Volumen III; Etapa III, Volumen I e Informe Final. Ministerio de Obras y Servicios Públicos. Administración Provincial del Agua.
- Cuello, P.; A.M., Montone; M., Sanchez y M., Silvariño. (1998). Impacto ambiental de las lluvias en la ciudad de Santa Rosa. Anuario Facultad de Ciencias Humanas UNLPam(1), Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional de La Pampa. ISSN: 1514-6227.
- Danielsen Sørup, H. J.; S.M., Lerer; K., Arnbjerg-Nielsen; et al. (2016). Efficiency of storm-water control measures for combined sewer retrofitting under varying rain conditions: Quantifying the three points approach (3PA). *Environmental Science and Policy*(63), 19-26.
- Davis, J.; C., Rohrer y L., Roesner. (2006). Effects of four catchment modifications on urban runoff. *Hydrology Days Conference*, (págs. 13-24).
- de Moura, M.; J., Galvinctio; L., Brito; L., Souza; I., Sá y T., Silva. (2007). Clima e água de chuva no semi-árido. Potencialidades da água de chuva no semi-árido brasileiro. EMBRAPA Semiárido, 35-59. Recuperado el agosto de 2019, de <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/159649>
- Delleur, J. W. (2003). The evolution of urban hydrology: past, present, and future. *Journal of hydraulic engineering*, 129(8), 563-573.
- Depettris, C. A. y H.R., Rohrmann. (2007). Apunte de procesos hidrológicos urbanos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste.
- Devoto, G. A. (2002). Regionalización de lluvias intensas en Argentina. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas y de Ingeniería. Universidad Católica Argentina.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2013). Manual de Drenaje Urbano. Gobierno de Chile. Recuperado el Agosto de 2019, de <http://www.doh.gov.cl/manualdrenajeurbano/Paginas/default.aspx>
- Dorado, J.; J.R., Rabuñal; J., Puertas; A., Santos y D., Rivero. (2002). Prediction and modelling of the flow of a typical urban basin through genetic programming. *EvoWorkshops LNCS 2279*, (págs. 190-201). Berlin, Alemania.

- Drayna P.; S.L., McLellan; P., Simpson; S.H., Li y M.H., Gorelick. (2010). Association between rainfall and pediatric emergency department visits for acute gastrointestinal illness. *Environ. Health Perspect.* 118: 1439–1443.
- Economides, C. (2013). Green infrastructure sustainable solutions. En C. d. Agua, 11 cities across the United States. Universidad de Columbia. Estados Unidos. Recuperado el agosto de 2019, de http://water.columbia.edu/files/2014/Green_Infrastructure_FINAL.pdf
- Ellis, J. B. (2013). Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 56(1), 24-41. doi:10.1080/09640568.2011.648752
- European Commission. (2013). Building a Green Infrastructure for Europe. ISBN: 978-92-79-33428-3. doi:10.2779/54125
- Feldman, I. (2017). Recurrencia de sequías e inundaciones en llanuras argentinas. *Revista de divulgación técnica agropecuaria, agroindustrial y ambiental*, 4(1), 56-66.
- Ferrando, F. A. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*(15), 25-42. doi:10.5354/0717-5051.2010.5129
- Fisher-Jeffes, L. (2015). The viability of rainwater and stormwater harvesting in the residential areas of the Liesbeek River catchment, Cape Town. Tesis doctoral. Ciudad del Cabo, Sudáfrica: Universidad del Cabo.
- Fletcher, T. D.; H., Andrieu y P., Hamel. (2012). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving water: a state of the art. *Advances in Water Resources*(51), 261-279.
- Fletcher, T. D.; W., Shuster; W.F., Hunt; R., Ashley; D., Butler; S., Arthur y P., Mikkelsen. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more. The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542.
- Fujita, S. (1994). Infiltration structures in Tokio. *Water Science and Technology*, 30(1), 33-41.
- Garba, H.; I., Abubakar y F.O., Oriola. (2013). Calibration of Hydrognomon Model for simulating the hydrology of urban catchment. *Open Journal of Modern Hydrology*(3), 75-78.
- García, H. L. (2017). Actualización del modelo conceptual en una zona del acuífero Santa Rosa-Anguíl, provincia de La Pampa, Argentina. Tesis de maestría Recursos Hídricos. Universidad Nacional de La Pampa.

- Ghani, A. A.; N., Zakaria; C., Chang y A., Ainan. (2008). Sustainable urban drainage system (SUDS)- Malaysian experiences. 11th International Conference on Urban Drainage, 31, págs. 1-10.
- Giai, S. B. y J.O., Tullio. (1998). Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa. Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería(12), 51-68.
- Gomez Tournier, M. (2017). Tratamiento paisajístico de un centro holístico integrado al bosque serrano Charbonier. Provincia de Córdoba. Proyecto Área de Consolidación de Espacios Verdes. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
- Gonzalez Uriarte, M.; E., Navarro; M., Varni; I., Entraigas; M., Gandini y F.X., Pereyra. (2004). Capítulo 3: Inundación y Anegamiento. En G. M. Bejerman, Peligrosidad Geológica Argentina. Metodologías de análisis y mapeo. Estudio de casos. (págs. 219-228). Buenos Aires, Argentina: ISBN: 987-21766-0-4.
- Gumbel, E. J. (1954). Statistical Theory of Extreme Values and some practical applications. A series of lectures. Washington D.C.: NTIS. Recuperado el septiembre de 2019, de <http://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB175818.xhtml>
- Guo, Y. (2001). Hydrologic design of urban flood control detention ponds. Journal of Hydrologic Engineering(6), 472-479.
- Hansen, R.; E., Rall; E., Chapman; W., Rolf y S., Pauleit. (2017). Urban Green Infrastructure Planning. A guide for practitioners. Green Surge. Recuperado el Junio de 2019, de <http://greensurge.eu/working-packages/wp5/>
- Harremoës, P. (1994). Integrated and stochastic features of urban drainage systems. Journal of Water Science and Technology, 30(1), 1-12.
- Ingeniería Hidráulica S.C. (1993). Desagües pluviales del sector noreste de la ciudad de Santa Rosa. Informe Parcial. N°1. Anteproyecto integral, memoria descriptiva y técnica. La Pampa: Administración provincial del Agua (APA). Ministerio de Obras y Servicios Públicos.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2003). El agua y la ciudad sostenible. Hidrogeología urbana. Junta Directiva AIH-GE. Textos del Simposio, conferencias, ponencias y comunicaciones. (pág. 342). Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 84-7840-539-9.

- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). (2010). Censo Nacional de población, hogares y viviendas 2010. Recuperado el abril de 2017, de http://www.indec.gob.ar/censos_provincia-les.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=41&id_tema_3=135&p=42&d=021&t=0&s=0&c=2010
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). (2019). Población estimada al 1 de julio de cada año calendario por sexo, según departamento. Recuperado el junio de 2019, de https://www.indec.gob.ar/nivel4_default.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=24&id_tema_3=
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2013). Cosecha de agua, recurso estratégico del presente y del futuro. *INTA informa*, 12(140).
- Jia, H.; H., Ma; Z., Sun; S., Yu; Y., Ding, Y.e Y., Liang. (2014). A closed urban scenic river system using stormwater treated with LID-BMP technology in a revitalized historical district in China. *Ecological Engineering*, 71, 448-457. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.07.049
- Jiang, Y. C. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management. A contemporary review of China`s challanges and "sponge cities"strategies. *Environmental Science and Policy*(80), 132-143.
- Jimenez, A. F. y J.L., Joya. (2015). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como gestión integral en la regulación y control de aguas de lluvias; caso de estudio sector en la ciudad de Bogotá*. Bogotá D.C., Colombia: Programa de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Colombia.
- Jing, L.; Q., Luan; H., Wang y X., Gao. (2019). Construction and application analysis of SWMM Model in Beijing. *Future Science Park. Environmental Earth Science*, 139-150. doi:10.1007/978-3-319-61630-8_12
- Kambites, C. y S., Owen. (2006). Renewed prospects for green infrastructure planning in the UK. *Planning Practice and Research*, 21(4), 483-496. doi:10.1080/02697450601173413
- Kessler, R. (2011). Estrategias para el manejo de las aguas pluviales: las ciudades acondicionan la infraestructura anticuada para el cambio climático. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), A514-A519.
- Knighton, J.; E., Lennon; L., Bastidas y E., White. (2016). Stormwater detention system parameter sensitivity and uncertainty analisys using SWMM. *Journal of Hydrologic-Engineering*, 21(8). doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0001382
- Kourtis, I. M.; G., Kopsiaftis; V., Bellos y V., Tsihrintzis. (2017). Calibration and validation of SWMM model in two urban carchments in Athens, Greece. 15th International Conference on Environmental Science and Technology. Rhodes, Greece.

- Kozanis, S.; A., Christofides; N., Mamassis; A., Efstratiadis y D., Koutsoyiannis. (2005). Hydrognomon: a hydrological data management and processing software tool. European Geoscience Union (EGU)General Assambly, Session HS29: Hydrological modelling software demonstration. Viena, Austria. doi:10.13140/RG.2.2.34222.10561
- Kozanis, S.; A., Christofides; N., Mamassis; A., Efstratiadis y D., Koutsoyiannis. (2010). Hydrognomon: Open Source software for the analysis of hydrological data. European Geoscience Union (EGU) General Assembly. HS5.5/NP6.10: Stochastics in hydrometeorological processes from point to global spatial scales and from minute to climatic time scales. doi:10.13140/RG.2.2.21350.83527
- Kreimer, A.; D., Kullock y J., Valdés. (2001). Inundaciones en el área metropolitana de Buenos Aires. En B. Mundial, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (pág. 250). ISBN: 0821347675, 9780821347676.
- Kruse, E.; L., Valera; P., Laurencena; M., Deluchi; A., Rojo y E., Carol. (2003). Modificaciones del ciclo hidrológico en un área del Noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Simposio del agua y la ciudad sostenible. Hidrogeología Urbana. Barcelona, España.
- Kyle, E. T. (2012). Study of rainwater harvesting quality . Clean Waters, 33-35.
- Lashford, C. M.; Y., Rubinato; J., Cai; S., Abolfathi; S., Coupe y S.C., Tait. (2018). SuDS & Sponge Cities: A comparative analysis of the implementation of pluvial flood. Management in the UK and China. Sustainability, 11(213), 1-14. doi:10.3390/su11010213
- Lee, J. G.; C.T., Nietch y S., Panguluri. (2018). Drainage area characterization for evaluating green infrastructure using the Storm Water Management Model. Hydrology and Earth System Sciences, 22(5), 2615-2635. doi:10.5194/hess-2017-166
- Linsley, R. K.; M.A., Kohler y J., Paulus. (1977). Hidrología para ingenieros. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Inc. ISBN: 0-07-090914-8.
- Martínez Candelo, G. (2013). Sistemas urbanos de drenaje sostenible" SUDS" como alternativa de control y regulación de las aguas lluvias en la ciudad de Palmira. 125. Bogotá, Colombia: (Tesis para obtener el título de Ingeniería Civil) Universidad Militar Nueva Granada.
- McCuen, R. H.; P., Johnson y R., Ragan. (1996). Highway Hydrology (2nd ed., Vol. 2). Washington, DC.: Federa Highway Administration.
- McCutcheon, M. y D., Wride. (2013). Shades of green using SWMM LID controls to simulate green infrastructure. Journal Water Management Model(21), 289-301. doi:10.14796/JWMM.R246-15

- Mecca, J. (2008). Análisis y modelación del comportamiento hidrológico de las lagunas Don Tomás y Bajo Giuliani, Santa Rosa, La Pampa. Tesis de maestría en Ciencias Hídricas. Universidad Nacional de La Pampa.
- Méndez-Morales, M. (2013). Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM en cuencas hidrográficas de alta pendiente en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(2), pág. 20-31. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1400>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (1996). Técnicas alternativas para soluciones de aguas de lluvias en sectores urbanos: guía de diseño. Gobierno de Chile. Recuperado el agosto de 2019, de http://biblio.uchile.cl/client/en_US/default/search/detailnonmodal:jsessionid=8CE3C4B22E1BA4970C2A9E4029994A7?qu=Vivienda+--+Chile&d=ent%3A%2F%2FSD_ILS%2FS0%2FD_ILS%3A279032%7E%7E0&ic=true&ps=1000
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2005). Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas de lluvia. Gobierno de Chile. Recuperado el agosto de 2019, de <http://www.hesep.cl/intranet/upload/documentos/5c9102de5a5ed.pdf>
- National Surface Water Management & SuDS Group. (2019). SuDS Techniques. Recuperado el agosto de 2019, de <http://www.sudswales.com/types>
- New York City Environmental Protection. (2010). NYC green infrastructure plan. A sustainable strategy for clean waterways. Recuperado el agosto de 2019, de http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/green_infrastructure/NYCGreenInfrastructurePlan_ExecutiveSummary.pdf
- Niyonkuru, P. (2019). Calibration and validation of EPA SWMM for stormwater runoff modelling in Nyabugogo catchment, Rwanda. *Journal of Sustainable Research in Engineering*, 4(4), 152-159.
- Nugra Loja, D. (2013). Identificación, análisis de riesgos y desarrollo de una matriz para el control de seguridad y salud en el trabajo aplicado a la construcción de alcantarillado en la empresa ETAPA EP. Tesis de grado Ingeniería Industrial, 244. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. E-ISBN: 978-92-5-307581-2(PDF).
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2018). Rainwater Harvesting as adaptation strategy for Africa. Recuperado el agosto de

2019, de http://www.unesco.org/new/en/nairobi/about-this-office/single-view/news/rainwater_harvesting_as_adaptation_strategy_for_africa

- Pacey, A. y A., Cullis. (1986). Rainwater harvesting: The collection of rainfall and runoff in rural areas. IT Publication.
- Palla, A. e I., Gnecco. (2015). Hydrologic modelling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*(528), 361-368.
- Perales Mompaler, S. (2018). La gobernanza y los SUDS: experiencias internacionales y situación en España. *Cátedra del agua y la sostenibilidad*.
- Perales Mompaler, S. e I., Andrés-Doménech. (2007). Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible: Una alternativa a la gestión de agua de lluvia. *Equipamiento y servicios municipales*(133), 66-77.
- Perez, S. y E., Sierra. (2012). Changes in rainfall patterns in the eastern area of La Pampa province, Argentina. *Revista Ambiente y Agua en Journal of Applied Science*, 7(1), 24-35. doi:<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.692>
- Perez, S.; E., Sierra; E., Lopez; G., Nizzero, G.; F., Momo y M., Massobrio. (2011). Abrupt changes in rainfall in the eastern area of La Pampa province, Argentina. *Theoretical Applied Climatology*(103), 159-165.
- Perez, S.; E., Sierra; G., Casagrande; G., Vergara y G., Bernal. (2003). Comportamiento de las precipitaciones (1918/2000) en el centro oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa*, 14(1-2), 39-46.
- Perini, K. (2016). Bottom-Up initiatives for green and blue infrastructure. *Urban sustainability and river restoration*, 177-189. doi:10.1002/9781119245025.ch16
- Perini, K. y P., Sabbion. (2017). *Urban Sustainability and river restoration: green and blue infrastructure*. Inglaterra: WilleyBlackwell ISBN:9781119244967.
- Polanco, C. (2013). Determinación del grado de retención de nitrógeno y fósforo en las lagunas secundarias de la planta de tratamiento sur de agua residual de la ciudad de Santa Rosa en un día de verano. Tesina de grado de Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa.
- Pratts, P.; E., Castro y M., Castro. (2018). Evolución espacio-temporal y variaciones en la salinidad de un humedal somero: Caso Bajo Giuliani, La Pampa, Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología (pág. 109). ISBN: 978-987-633-537-9.

- Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente. (2006). Rainwater harvesting could end much of Africa's water shortage. Recuperado el agosto de 2019, de <http://news.un.org/en/story/2006/11/199382-rainwater-harvesting-could-end-much-africas-water-shortage-un-reports>
- Puricelli, M. y G., Casagrande. (2015). Relación entre valores de intensidad sub-horarias y diaria en la localidad de Santa Rosa, provincia de La Pampa. Primeros avances. XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Argentina.
- Qiu, B. (2015). The connotation approach and perspective of sponge city and LID. *Water Wastewater Engineering*(41), 1-7.
- Qiu, G.; H., Li; Q., Zhang; C., Wan; X.L., Liang y X., Li. (2013). Effects of evapotranspiration on mitigation of urban temperature by vegetation and urban agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8), 1307-1315.
- Rahman, A.; J., Dbais; C., Mitchell; P., Ronaldson y S., Shrestha. (2007). Study of rainwater tanks as a source of alternative water supply in a multistory residential building in Sydney, Australia. *Environmental and Water Resources Congress*. EEUU: ISBN: 978160433063.
- Riccardi, G. A. (1997). La transformación lluvia caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado. *Cuadernos del CURIHAM*, 4 (2), págs. 69-87.
- Roberto, Z.; G., Casagrande y E., Viglizzo. (1994). Lluvias en La Pampa Central: tendencia y variaciones del siglo. *Cambio Climático y Agricultura Sustentable en la Región Pampeana*. Boletín INTA Centro Regional La Pampa-San Luis(2), 25.
- Rodríguez Sánchez, J. (2013). Nuevas tendencias en la gestión de drenaje pluvial en una cuenca urbana. Tesis de Master Interuniversitario en Dirección de Proyectos. La Rioja, Argentina: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de La Rioja.
- Rosa, D. J.; J., Clausen y M., Dietz. (2015). Calibration and verification of SWMM for Low Impact Development. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 1-12. doi:10.1111/jawr.12272
- Rossman, L. (2009). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. Environmental Protection Agency (EPA).
- Ruberto, A.; C., Depettris; J., Pilar; A., Prieto; S., Gabazza y M., Zarate. (2006). Impacto hidrológico por incremento de las áreas impermeables en cuencas urbanas. Resistencia, Chaco: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste.

- Sabbion, P. (2016). River Thames, England - Strategies and technique. *Urban Sustainability and River Restoration*, 138-150. doi:10.1002/9781119245025.ch13
- Sanchez Román, L. A. (2010). Nueva herramienta para el análisis de sistemas de drenaje pluvial urbano. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 31(1), 15-25.
- Sanchez Román, L. e Y., Martinez Gonzalez. (2013). Sensibilidad y regionalización del parámetro de impermeabilidad en una cuenca. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(1), 203-212 ISSN: 2007-2422.
- Sau Soto, N. (1996). Estudio topohidráulico e hidrológico para el cruce del km 0+20 sobre el río Altar estado de Sonora, México. 32-47. División de Ingeniería. Universidad de Sonora.
- Scholz, M. (2016). Sustainable Drainage System Model. *Wetlands for water pollution control*, 313-338. doi:10.1016b978-0-444-63607-2.00030
- Schuetze, T. (2013). Rainwater harvesting and management. Policy and regulations in Germany. *Water Science and Technology. Water Supply*, 13(2), 376-385.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). Bogotá construcción sostenible. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá. Recuperado el agosto de 2019, de <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/gestion-ambiental-constructoras>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2013). Guía de manejo ambiental para el sector de la construcción (2nda ed.). Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá. Recuperado el agosto de 2019, de https://www.academia.edu/37027708/SECRETAR%C3%8DA_DISTRI-TAL_DE_AMBIENTE_GU%C3%8DA_DE_MANEJO_AMBIENTAL_PARA_EL_SECT-OR_DE_LA_CONSTRUCCI%C3%93N_II_Edici%C3%B3n
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2019). Atlas Climático Argentino. Recuperado el abril de 2019, de <http://www.smn.gob.ar/clima/atlasclimatico>
- Soto, M.; L., Barbaro; M., Coviella y S., Stancanelli. (2014). Catálogo de plantas para techos verdes. Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación.
- Stehli, P.; J., Weber y L., Vestena. (2016). Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca urbana- Avances. 3º Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos. . Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional del Agua (INA). ISBN: 978-978-45194-6-7.

- Sun, N.; M. Hall; B., Hong y L., Zhang. (2014). Impact of SWMM catchment discretization: case study in Syracuse, New York. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(1), 223-234. doi:10.1061((asce)he.1943-5584.00007
- Suriano, J. y L., Ferpozzi. (1993). Los cambios climáticos en La Pampa también son historia. *Todo es Historia*(306), 8-25.
- Taji, S. y D., Regulwar. (2019). LID coupled design of drainage model using GIS and SWMM. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1-14. doi:10.1080/09715010.2019.1660919
- Tal, A. (2006). Seeking sustainability: Israel's evolving. *Water Management Strategy Science*, 313(5790), 1081-1084. doi:10.1126/science.1126011
- Témez, J. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.
- Témez, J.R. (1987). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección general de carreteras. MOPU. Madrid
- Tillinghast, E. D.; W.F., Hunt; G.D., Jennings y P., D'Arconte. (2012). Increasing stream geomorphic stability using storm water control measures in a densely urbanized watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(12), 1381-1388. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000577
- Toit, M.; S., Cilliers; M., Dallimer; M.G. y S., Cornelius. (2018). Urban green infrastructure and ecosystem services in sub-Saharan Africa. *Landscape and Urban Planning*(180), 249-261. doi:10.1016/j.landurbplan.2018.06.001
- Torres, A.; S., Galarza-Molina y L., Molina-Prieto. (2019). Bogotá, una ciudad sensible al agua: elementos de reflexión. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*(13). doi:10.11144/Javeriana.cvu12-23.bcsa
- Tullio, J.; M. Dalmaso; C.M., Camilletti y M., Casanovas. (2015). Registro y análisis del comportamiento piezométrico de las aguas subterráneas del subsuelo de la ciudad de Santa Rosa. Fundación Ciencias. Consejo Federal de Inversiones (CFI).
- Tyson, J.; T., Evans y N., Orman. (2016). *Urban drainage and the water environment: a sustainable future?* Inglaterra: Foundation for Water Research.
- Universidad Nacional de La Pampa. Consultora. (2015). *Inventario de los recursos hídricos de la provincia de La Pampa. Tomo I.*

- Varena, C.; M., Varni e I., Entraigas. (2004). Curvas Intensidad-Duración-Recurrencia para diez años de datos pluviométricos en la ciudad de Azul, centro de la provincia de Buenos Aires. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 3(4), 67-70.
- Villalba, G.; H. Rosatto; H., Friedrich; C., Caso; G., G. Calvo; D., Perez y N. Mazzeo. (2012). Inundaciones en cuencas urbanas alternativas de prácticas de ordenamiento bajo el concepto SUDS. 1º Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos (IFRH). Ezeiza, Buenos Aires, Argentina: ISBN: 978-987-20109-6-6.
- Warwick, J., J., Member y P. Tadeballi. (1991). Efficacy of SWMM application. *Journal Water Resource Planning Management*(117), 352-366.
- Weber, T. (2010). Urban water management in Australia. Facilitating uptake. *Wastewater and Urban Drainage Conference*. Sidney, Australia.
- Weiss, L. (1964). Ratio of true to fixed interval maximum rainfall. *Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers*, 90(HY-1), 77-82.
- Wong, T.H.F. (2000). Improving urban stormwater quality - from theory to implementation. *Water - Journal of the Australian Water Association*, 27 (6), 28–31.
- Woods-Ballard, B.; R., Kellagher; P. Martin; C., Jefferies; R., Bray y P., Shaffer. (2007). *The SUDS manual*. Londres: CIRIA.
- World Meteorological Organization (WMO). (2019). *Guidance on integrated urban hydrometeorological, climate and environmental services*. ISBN: 978-92-63-11234-7.
- Yu, H., G. Huang y C. Wu. (2014). Application of the stormwater management model to a piedmont city: a case of study of Jinan City, China. *Water Science and Technology*, 70(5), 858-864. doi:10.2166/wst.2014.302
- Zaghoul, N. (1983). Sensitivity analysis of the SWMM runoff transport parameters and the effects of catchment discretisation. *Water Resources* (6), 214-223. doi:0309-1708/831040214-10