

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



MAESTRÍA EN INGENIERÍA
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

**ÁREAS FUENTES VARIABLES
COMO PROCESO DE
GENERACIÓN DE
ESCORRENTÍA DOMINANTE
EN ZONAS DE LLANURA:
IDENTIFICACIÓN E
INCERTIDUMBRE EN LA
MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

Camilo Alfonso Álvarez León

FICH

FACULTAD DE INGENIERIA
Y CIENCIAS HIDRICAS

Tesis de Maestría 2020

**Maestría en Ingeniería
de los Recursos Hídricos**

Título de la obra:

**ÁREAS FUENTES VARIABLES COMO PROCESO DE
GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA DOMINANTE EN
ZONAS DE LLANURA: IDENTIFICACIÓN E
INCERTIDUMBRE EN LA MODELACIÓN
HIDROLÓGICA**

Autor: Camilo Alfonso Álvarez León

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

Sistemas Hidrológicos de Llanuras

Áreas Fuentes Variables

Sensores Remotos

Inundación

SWAT



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**ÁREAS FUENTES VARIABLES COMO PROCESO DE
GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA DOMINANTE EN
ZONAS DE LLANURA: IDENTIFICACIÓN E
INCERTIDUMBRE EN LA MODELACIÓN
HIDROLÓGICA**

Camilo Alfonso Álvarez León

Tesis remitida al Comité Académico de la Maestría

como parte de los requisitos para la obtención

del grado de

MAGÍSTER EN INGENIERÍA

DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2020

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje
“El Pozo”, S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**ÁREAS FUENTES VARIABLES COMO PROCESO DE
GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA DOMINANTE EN
ZONAS DE LLANURA: IDENTIFICACIÓN E
INCERTIDUMBRE EN LA MODELACIÓN
HIDROLÓGICA**

Camilo Alfonso Álvarez León

Lugar de Trabajo: Santa Fe, Argentina

FICH

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

Director:

Dr. Ing. Carlos César Scioli

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Hídricas Universidad Nacional
del Litoral

Co-director:

Dr. Ing. Cristian Guevara Ochoa

Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y
Técnicas (Conicet) e Instituto de
Hidrología de Llanuras (IHLLA)

Jurado Evaluador:

Dr. Ing. Erik Zimmermann

Dra. Ing. Marta Marizza

Mg. Sofía Havrylenko

Universidad Nacional de Rosario
Universidad Nacional del Litoral
Universidad Nacional del Litoral

2020

Acta de evaluación de tesis



ACTA DE EVALUACIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

En la sede de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, en la ciudad de Santa Fe, a los veintidós días del mes de agosto del año 2020 se reúnen en forma virtual los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos titulada: *"Áreas fuentes variables como proceso de generación de escorrentía dominante en zonas de llanura: identificación e incertidumbre en la modelación hidrológica"*, desarrollada por el Ing. Camilo Alfonso ÁLVAREZ LEÓN, Pasaporte N.º AV365950, bajo la dirección del Dr. Carlos Scioli y la codirección del Dr. Cristian Guevara Ochoa. Ellos son: el Dr. Erik Zimmermann, la Mag. Sofia Havrylenko y la Dra. Marta Marizza.

La presentación oral y defensa de la Tesis se efectúa bajo la modalidad virtual según lo establecido por Resolución de Rector N.º 529/20 y Resolución de Consejo Directivo N.º 015/20.

Escuchada la Defensa Pública y evaluada la Tesis, el Jurado resuelve:

Calificar con nota 10 (Sobresaliente).

Se destaca el aprendizaje de herramientas tales como SIG, teledetección y modelación hidrológica que ha permitido al tesista llegar a buenos resultados. El planteo de los objetivos y la metodología utilizada han permitido arribar a resultados satisfactorios. Las conclusiones son adecuadas y pertinentes al trabajo de tesis. Las recomendaciones y las líneas futuras permiten una continuidad de la investigación. La exposición de la tesis ha sido muy clara sintetizando muy bien el trabajo y en el tiempo previsto.

José Luis M. Pizarro
DNI 14.830.760
Secretario de Posgrado FICH

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 2017
Rv98 Nacional N.º 168 - Km. 472.A
30000 Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 214
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar



Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente

Dr. Erik Zimmermann

Mag. Sofia Havrylenko

Dra. Marta Marizza

Jose Luis Mayor
D.N.S. 14.830.460
Secretario de Posgrado FICH

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Exactas
Secretaría de Posgrado

Ciudad Unzué
C.C. 217
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4
33000 Santa Fe
Tel: (54) (3342) 4575 329
Fax: (54) (3342) 4575 324
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Santa Fe, 21 de agosto de 2020.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada "*Áreas fuentes variables como proceso de generación de escorrentía dominante en zonas de llanura: identificación e incertidumbre en la modelación hidrológica*", desarrollada por el Ing. Camilo Alfonso ÁLVAREZ LEÓN, certificarnos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Dr. Erik Zimmermann

Mag. Sofia Havrylenko

Dra. María Marizza

Santa Fe, 21 de Agosto de 2020.

Certifico haber leído esta Tesis preparada bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Dr. Cristian Guevara Ochoa
Codirector de Tesis

Dr. Carlos Soló
Director de Tesis

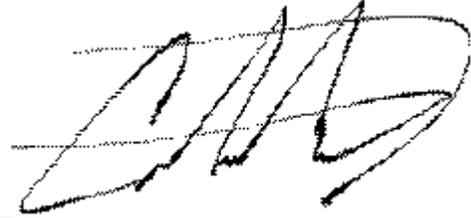
José Luis Meyer
DNI 14.839.760
Secretario de Posgrado FICH

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 217
Ruta Nacional N° 152 - Km. 472,4
(3000) Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 224
E-mail: posgrado@ich.unl.edu.ar

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no han sido presentadas para optar a un título de posgrado en ninguna otra Universidad o Institución.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Camilo Alfonso Álvarez León

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y a todos los docentes que hicieron parte de mi formación durante estos años. Especialmente el Dr. Carlos Scioli que además de dirigir esta tesis depositó en mi toda su confianza y me apoyo en todo momento para lograr desarrollar el presente estudio. Para la realización del mismo se recibieron fondos de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Litoral en el marco del Proyecto CAI+D 2017 (Aplicación de un índice de simulación hidrológica distribuido para la simulación precipitación – escorrentía en la cuenca inferior del Río Salado), donde el Dr. Carlos Scioli es el co director.

En igual medida, agradezco al Dr. Cristian Guevara por el apoyo, orientación, aportes y sugerencias que han contribuido a mejorar esta tesis.

Al equipo del Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo Jorge Usunoff y el Centro de Hidrología y Gestión del Agua CHyGA.

A mis compañeros de maestría y amigos, por el cariño y los ánimos recibidos. Particularmente a las familias Sejas Achenbach y Borla Peirotti en Santa Fe.

Finalmente quiero agradecer especialmente a mis padres, Wilson y Yaneth que junto con mi hermana Daniela y Aura son el pilar fundamental de mi vida y gracias a su esfuerzo, apoyo, paciencia, comprensión y amor incondicional todo es posible.

Resumen

El objetivo de esta tesis fue investigar los procesos de “Áreas Fuente Variables” (Variable Source Areas, VSA’s) y evaluar la aplicación del modelo de simulación hidrológica “SWAT” en un sistema de llanura. Estas áreas se generan por el ascenso del nivel freático hasta la superficie del terreno, en las zonas bajas próximas a la red de drenaje, originando la saturación de estos sectores. La ocurrencia de precipitación sobre estas áreas ocasiona un escurrimiento superficial de saturación, mecanismo considerado dominante por algunos autores en la generación de escorrentía en pequeñas cuencas de regiones húmedas. Las investigaciones de esta tesis se desarrollaron sobre la cuenca de llanura Arroyo las Prusianas (569 km²), ubicada en la Provincia de Santa Fe. Las VSA’s se delimitaron en la cuenca a partir de la información de sensores remotos (Landsat 8) para distintas fechas. La metodología de caracterización del gráfico 2D de la banda infrarrojo de onda corta (SWIR) versus el Índice de Humedad Diferencial Normalizado (NDWI) resultó adecuada para identificar áreas saturadas. Esta caracterización permitió distinguir las zonas húmedas de otras coberturas superficiales y puede ser extrapolada a zonas de llanura similares. Por otra parte, se realizó una simulación matemática a escala diaria para un lapso de 14 años (2005 –2018) con el modelo hidrológico semi-distribuido SWAT modificando el mapa de usos del suelo en base a la consideración de un periodo en condición de humedad: normal y húmedo. La aplicación del modelo arrojó resultados aceptables teniendo en cuenta el ajuste entre los caudales observados versus los simulados en el cierre de cuenca. Sin embargo, a pesar que el modelo no puede simular las VSA’s, se concluye que cambiando el mapa de usos del suelo se puede contemplar este fenómeno tan importante en una zona de llanura. Para el periodo de calibración se obtuvo un coeficiente de Nash Sutcliffe (NS) de 0.69 y R² de 0.7 y pbias= 4.9%. *Según el balance hídrico promedio anual en condiciones normales de humedad, de la precipitación total, se evapotranspira alrededor del 74.7%, se recarga el 17.2% y escurre el 8.1%. Sin embargo, contemplando la aparición de las VSA’s en la cuenca, el balance de agua se modifica y del total de precipitación, se evapotranspira el 72.5%, se recarga el 12.7% y escurre el 14.8%.*

Los resultados de esta tesis evidenciaron la importancia de incorporar en la simulación hidrológica el fenómeno de VSA's característico de los sistemas de llanura ya que mejoran la representación de los patrones espacio – temporales a escala diaria de la humedad del suelo, recarga, escurrimiento superficial, evapotranspiración y su permanente interacción con el nivel freático en las formaciones hidrogeológicas. Con las técnicas de calibración incluidas en la presente investigación se logra *disminuir la incertidumbre en el modelado hidrológico continuo en zonas de llanura con alta presencia de VSA's en pro de avanzar en la gestión adecuada de los recursos hídricos ya que este fenómeno afecta drásticamente la predicción de inundaciones, sedimentos y fuentes difusas de contaminación, entre otras...*

Abstract

The aim of this thesis was to investigate variable source areas (VSA's) processes and evaluate the performance of SWAT model on plain systems. These areas are generated by the rise of the groundwater levels up to the surface, in the lowland catchments near the drainage network, causing saturation of these sectors. Once the soils in these areas saturate to the surface, any additional rainfall that falls (irrespective of intensity) becomes saturation-excess overland flow, this mechanism is considered dominant by some authors in the generation of runoff in small basins of humid regions. Research of this thesis were developed on the experimental Arroyo las Prusianas basin (569 km²), located in Santa Fe province. The VSA's were identified and defined using remote sensors for different dates. A bi-plot methodology, that uses shortwave infrared (SWIR) band versus Normalized Difference Wetness Index (NDWI) resulted right to identify saturated areas in plain systems. The methodology also allows to identify wetlands, urban zone, dry soil and vegetation areas and can be extrapolated to similar plain systems. On the other hand, a mathematical simulation was carried out on a daily scale for a period of 14 years (2005 –2018) with the semi-distributed hydrological model SWAT modifying the land use map based on the consideration of two different wet conditions periods: normal and humid. The application of the model yielded acceptable results taking into account the adjustment between the observed flows versus those simulated in the basin closure. However, despite the fact that the model cannot simulate the VSAs, it is concluded that by changing the land use map, this important phenomenon can be model in a plain area. For the calibration period, a Nash Sutcliffe coefficient (NS) of 0.69 and R² of 0.7 and pbias = 4.9% was obtained. According to the annual average water balance under normal humidity conditions, of the total precipitation, around 74.7% is evapotranspires, 17.2% is recharged and 8.1% runoff. However, considering the appearance of the VSA's in the basin, the water balance is modified and of the total precipitation, 72.5% is evapotranspired, 12.7% is recharged and 14.8% becomes runoff.

The results of this thesis showed the importance of incorporating in the hydrological simulation the phenomenon of VSA's characteristic of the plain systems since they improve the representation of the spatial-temporal patterns on a daily scale of soil moisture, recharge, surface runoff, evapotranspiration and its permanent interaction with the water table in hydrogeological formations. With the calibration techniques included in this research, it is possible to reduce the uncertainty in the continuous hydrological modeling in plain areas with a high presence of VSA's in order to advance in the adequate management of water resources since this phenomenon drastically affects the prediction of floods, sediments and diffuse sources of pollution, among others ...

CONTENIDO

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Estado del arte.....	6
1.3 Objetivos	12
1.4 Organización de la tesis	13
Capítulo 2 Marco teórico.....	14
2.1 Mecanismos de generación de escorrentía.....	14
2.2 Modelación hidrológica	18
2.3 Modelos digitales de elevaciones.....	20
2.4 SIG en la modelación hidrológica.....	25
2.5 Teledetección en la hidrología	27
Capítulo 3 Cuenca Arroyo las Prusianas.....	30
3.1 Descripción general.....	30
3.2 Hidrometeorología	32
3.2.1 Información pluviométrica.....	32
3.2.2 Datos de caudales.....	33
3.2.3 Demostración no linealidad entre el proceso de precipitación-escorrentía 34	
3.3 Información freaticimétrica	38
3.4 Geología y suelos	39
3.5 Modelo digital de elevación.....	41
3.6 Imágenes de sensores remotos	41
Capítulo 4 Metodología y materiales.....	43
4.1 Base topográfica.....	46
4.2 Áreas Fuentes Variables.....	54
4.3 Modelo SWAT.....	62
4.4 Incertidumbre en la modelación hidrológica	66
Capítulo 5 Topografía.....	68
5.1 Modelo digital de elevación acondicionado	68

Capítulo 6 Identificación de VSA's mediante imágenes de sensores remotos.... 74

6.1 Pre-procesamiento.....	74
6.2 Índices espectrales.....	75
6.3 Clasificaciones supervisadas.....	75
6.4 Delimitación del triángulo producto del bi – plot entre SWIR2 Vs. NDWI.....	78
6.5 Comparación con metodología Scioli.....	81
6.6 Caracterización bi-plot NDWI Vs. SWIR2.....	83

Capítulo 7 Aplicación del modelo SWAT 88

7.1 Insumos de entrada SWAT para simular procesos hidrológicos	88
7.1.1 Información meteorológica.....	88
7.1.2 Topografía.....	89
7.1.3 Usos del suelo	92
7.1.4 Tipos del suelo	95
7.2 Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU).....	97
7.3 Resultados del modelo SWAT.....	100
7.3.1 Parámetros obtenidos en la calibración del flujo superficial	100
7.3.2 Ajuste de los caudales superficiales.....	103
7.3.3 Representación de VSA's con el SWAT	106
7.3.4 Balance hídrico	112

Capítulo 8 Conclusiones, recomendaciones y líneas futuras de investigación . 116

8.1 Conclusiones.....	116
8.2 Recomendaciones y líneas futuras de investigación.....	119

Referencias Bibliográficas..... 123

Anexos 144

Anexo 1. Índice de Precipitación Normalizado SPI.	144
Anexo 2. Funcionamiento del Modelo hidrológico semidistribuido continuo SWAT en su versión original.	147
Anexo 3. Mapas de VSA's obtenidos a partir de sensores remotos.	153
Anexo 4. Modelo hidrológico semidistribuido continuo SWAT.....	162

Lista de figuras

Capítulo 2 Marco teórico.....	14
Figura 2. 1. Clasificación de los mecanismos de generación de escorrentía.	16
Figura 2. 2. Factores incidentes en los mecanismos de generación de escorrentía.....	17
Capítulo 3 Cuenca Arroyo las Prusianas.....	30
Figura 3. 1. Cuenca Arroyo las Prusianas.	30
Figura 3. 2. Medias mensuales de precipitación para el periodo 1930-2015.....	32
Figura 3. 3. Estación Agrometeorológica R87359 INTA Rafaela.	33
Figura 3. 4. Localización de las secciones de control sobre el Arroyo las Prusianas.	34
Figura 3. 5. Evento de análisis febrero del 2014.....	35
Figura 3. 6. Eventos de análisis meses de febrero y marzo del 2015.....	36
Figura 3. 7. Evento de análisis mes de septiembre del 2018.	37
Figura 3. 8. Perfil del nivel freático promedio anual [m].	38
Figura 3. 9. Geología de la cuenca Arroyo las Prusianas.	39
Figura 3. 10. Mapa de suelos de la cuenca Arroyo las Prusianas.	40
Capítulo 4 Metodología y materiales.....	43
Figura 4. 1. Metodología.....	43
Figura 4. 2. MDE Alos palar.	47
Figura 4. 3. MDE SRTM.	48
Figura 4. 4. MDE IGN.	49
Figura 4. 5. Algoritmo de dirección de flujo D8.....	51
Figura 4. 6. Algoritmo MFD.....	52
Figura 4. 7. Algoritmo de dirección de flujo DINF.	52
Figura 4. 8. Algoritmo TOPAZ.....	53
Figura 4. 9. Funcionamiento de los algoritmos de dirección y acumulación de flujo.....	53
Figura 4. 10. Metodología a partir de teledetección.	54
Figura 4. 11. Imagen Landsat 8, Noviembre 15 del 2014.....	56
Figura 4. 12. Imagen Landsat 8, Abril 26 del 2016.	56
Figura 4. 13. (a) Falso color urbano imagen 15/11/2014. (b) Falso color urbano imagen 26/04/2016.....	59

Capítulo 5 Topografía..... 68

Figura 5. 1. Comparación cuencas generadas por diferentes MDE. 68
Figura 5. 2. Corrección sectorizada (1: Sur, 2: Norte, 3: Oeste) de la delimitación de la cuenca (Rojo: Alos Palsar, Negro: SRTM, Naranja: IGN). 70
Figura 5. 3. Red de drenaje actual digitalizada de la cuenca Arroyo las Prusianas.... 71
Figura 5. 4. Perfiles transversales en los límites difusos en la cuenca..... 71
Figura 5. 5. Detalle de la dinámica hídrica en los sectores difusos Sur, Norte y Oeste. 72
Figura 5. 6. Cuenca Arroyo las Prusianas producto del análisis de la mejor base topográfica. 73

Capítulo 6 Identificación de VSA's mediante imágenes de sensores remotos.... 74

Figura 6. 1. a) Imagen Landsat 8, Noviembre 15 del 2014. b) Imagen Landsat 8, Abril 26 del 2016..... 74
Figura 6. 2. (a) NDVI 15/11/2014. (b) NDVI 26/04/2016..... 75
Figura 6. 3. (a) NDWI 15/11/2014. (b) NDWI 26/04/2016..... 75
Figura 6. 4. (a) Clasificación supervisada imagen 15/11/2014..... 76
Figura 6. 5. Clasificación supervisada imagen 26/04/2016. 76
Figura 6. 6. (a) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 15/11/2014. (b) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 26/04/2016. 77
Figura 6. 7. Composición falso color contenido de humedad imagen 15/11/2014..... 79
Figura 6. 8. Composición falso color contenido de humedad imagen 26/04/2016..... 79
Figura 6. 9. a) Delimitación en el bi-plot imagen 15/11/2014. (b) Delimitación en la imagen 26/04/2016..... 80
Figura 6. 10. (a) Máscara del bi-plot imagen 15/11/2014. (b). Máscara del bi-plot imagen 26/04/2016..... 80
Figura 6. 11. (a) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 15/11/2014. (b) Máscara del bi-plot imagen 15/11/2014..... 82
Figura 6. 12. (a) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 26/04/2016. (b) Máscara del bi-plot imagen 26/04/2016..... 82
Figura 6. 13. Caracterización del triángulo generado entre el NDWI Vs. SWIR2. 84
Figura 6. 14. Imagen 15/11/2014: (a) Clasificación supervisada con 2 clases. (b) Máscara bi-plot. (Scioli, 2013) (c) Clasificación supervisada con 6 clases. (d) Máscara bi-plot NDWI Vs. SWIR2. (Scioli, 2013) (e) Falso color contenido de humedad (Scioli, 2013). 86
Figura 6. 15. Imagen 26/04/2016: (a) Clasificación supervisada con 2 clases. (b) Máscara bi-plot. (Scioli, 2013) (c) Clasificación supervisada con 6 clases. (d) Máscara bi-plot NDWI Vs. SWIR2. (Scioli, 2013) (e) Falso color contenido de humedad (Scioli, 2013). 87

Capítulo 7 Aplicación del modelo SWAT 88

Figura 7. 1. Insumos de entrada al SWAT para simular procesos hidrológicos. 88

Figura 7. 2. Mapa de MDE. 89

Figura 7. 3. Mapa de subcuencas, red de drenaje y cierre de cuenca. 90

Figura 7. 4. Comparación límites de cuenca. 91

Figura 7. 5. Mapa con valores de pendientes presentes en la cuenca. 92

Figura 7. 6. Mapa 1 de usos del suelo modificado del SET-SF, periodo normal. 94

Figura 7. 7. Mapa 2 de usos del suelo sensores remotos, periodo húmedo. 95

Figura 7. 8. Mapa de Tipos de suelos. 97

Figura 7. 9. Distribución espacial Principales 20 HRU's..... 98

Figura 7. 10. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Periodo calibración. 104

Figura 7. 11. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Periodo validación. 104

Figura 7. 12. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 1..... 107

Figura 7. 13. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 2 periodo normal. ... 108

Figura 7. 14. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 2 periodo húmedo. . 109

Figura 7. 15. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 3 periodo húmedo. . 110

Figura 7. 16. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 3..... 111

Figura 7. 17. Balance hídrico promedio anual cuenca Arroyo las Prusianas para el periodo 2009-2018. Precipitación (azul), evapotranspiración (verde), recarga (rojo) y escurrimiento superficial (naranja). 113

Figura 7. 18. Balance hídrico promedio mensual cuenca Arroyo las Prusianas para el periodo 2009-2018. Precipitación (azul), evapotranspiración (verde), recarga (rojo) y escurrimiento superficial (naranja). 115

Lista de tablas

Capítulo 4 Metodología y materiales.....	43
Tabla 4. 1. Descripción de los MDE analizados.	46
Tabla 4. 2. Descripción de las imágenes satelitales analizadas.	55
Capítulo 5 Topografía.....	68
Tabla 5. 1. Comparación de MDE mediante diferentes modelos de flujo.	68
Capítulo 6 Identificación de VSA's mediante imágenes de sensores remotos....	74
Tabla 6. 1. Imagen 15/11/2014.	77
Tabla 6. 2. Imagen del 26/04/2016.	78
Tabla 6. 3. Resultados por clase de contenido de humedad imagen 15/11/2014.....	80
Tabla 6. 4. Resultados por clase de contenido de humedad imagen 26/04/2016.....	81
Tabla 6. 5. Rangos de variación según cobertura.	83
Capítulo 7 Aplicación del modelo SWAT	88
Tabla 7. 1. Rangos de pendientes.....	91
Tabla 7. 2. Usos del suelo y/o coberturas implementados en el modelo SWAT.....	93
Tabla 7. 3. Área según cobertura superficial mapa 1 y 2 de usos del suelo.	94
Tabla 7. 4. Área según tipo de suelo.	96
Tabla 7. 5. Principales características de las subcuencas.....	98
Tabla 7. 6. Características de las principales 20 HRU's.....	99
Tabla 7. 7. Parámetros de calibración del SWAT y su rango de ajuste.	102
Tabla 7. 8. Análisis estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT en el punto de control para los periodos de calibración y validación.....	103
Tabla 7. 9. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 1.	106
Tabla 7. 10. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 2 periodo normal.....	107
Tabla 7. 11. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 2 periodo húmedo.	108
Tabla 7. 12. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 3 periodo húmedo.	110
Tabla 7. 13. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 3 periodo húmedo.	111
Tabla 7. 14. Balances hídricos promedio anual.	112

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

El agua es un elemento vital requerido en grandes cantidades en todos los sectores productivos en una o más etapas de su respectiva cadena de valor, como por ejemplo: en el sector primario (agricultura, ganadería, pesca, acuicultura, minería y la extracción de otros recursos naturales); en el secundario (industria pesada, transformación de productos, producción de electricidad y combustibles) y en el sector de los servicios (turismo y entretenimiento) (PNUD, 2006; OCDE, 2015).

El uso del recurso hídrico aporta significativamente a las economías en todo el mundo, pero su gestión es muy compleja porque depende directamente de circunstancias físicas, políticas, culturales y climáticas. En la actualidad, el cambio climático está aumentando drásticamente los peligros relacionados con el agua, como inundaciones, tormentas y sequías, que son responsables de 9 de cada 10 desastres naturales. Los riesgos asociados al cambio climático como variaciones en la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos son muy elevados y pese a esto, persisten las prácticas inadecuadas de conservación como por ejemplo: deforestaciones, canalizaciones de humedales y degradación de la calidad del agua por contaminación.

Además, la combinación del crecimiento económico, demográfico y la expansión urbana causan un aumento exponencial de la demanda de agua, al tiempo que el suministro se torna cada vez más irregular e incierto. Según un informe del “*2030 Water Resources Group*”, en un escenario climático en que todo sigue igual;

INTRODUCCIÓN

con el actual crecimiento demográfico, las prácticas de gestión del agua y el cambio en el patrón de consumo, el mundo enfrentará un déficit del 40% entre la demanda proyectada y el suministro de agua disponible a fines del año 2030 (WRG, 2013). Esto traccionará la producción mundial de alimentos, y especialmente la de Argentina, por sus amplias ventajas comparativas para la producción agropecuaria (INTA, 2017).

Por otro lado, las Naciones Unidas y el Banco Mundial calculan que para el 2025, alrededor de 1800 millones de personas vivirán en países o regiones con escasez absoluta de agua ya que las aguas subterráneas se agotan más rápido de lo que se reponen (NU, 2015; WB, 2019). Según la prospectiva, se prevé entonces mayores dificultades para satisfacer la demanda de agua en un futuro próximo (Zárate y Kuiper, 2013).

Para abordar esta crisis, el agua se propone como uno de los principales focos de atención en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y para lograr dar respuesta a esta problemática la UNESCO crea el Programa Hidrológico Internacional (PHI) (UNESCO, 2014-2021), que en su fase actual propone mejorar la seguridad hídrica mediante la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH). En Argentina está en marcha el Núcleo Socio Productivo Estratégico en Recursos hídricos (NSPE, 2013) que aborda múltiples problemáticas del agua siguiendo los lineamientos planteados a nivel internacional.

La seguridad hídrica garantiza que la comunidad acceda al recurso con calidad aceptable, mitiga los riesgos que afectan directamente la salud humana y contribuye al equilibrio del ecosistema. Un ecosistema saludable posee alto potencial hídrico y además aporta diversos beneficios al entorno, tales como: control de inundaciones,

INTRODUCCIÓN

reabastecimiento de las aguas del subsuelo, estabilización de las orillas de los ríos, protección contra la erosión, purificación del agua, conservación de la biodiversidad, transporte, entretenimiento y el turismo (NU, 2015).

Actualmente, el 70% del agua que se extrae en el mundo se destina a la agricultura (FAO, 2019). En 2050, para alimentar a 9700 millones de personas será necesario que la producción agrícola aumente en 60% y la extracción de agua en 15% (WRG, 2013). La producción agrícola requiere diversas cantidades de agua según el tipo de cultivo y las prácticas que se ejerzan sobre el mismo. Cada cosecha tendrá una eficiencia característica que se ve afectada por las condiciones climáticas que le confieren cierta incertidumbre. Según estimación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el consumo de agua de la producción agrícola de secano y regadío a nivel mundial tendrá un aumento al año 2030 de 14% (FAO, 2019).

Por sus favorables condiciones naturales, su historia en la producción agropecuaria, agroindustrial y su capital humano, la Argentina está posicionada como uno de los líderes en los mercados internacionales de productos agroalimenticios. La importancia estratégica de la agricultura en la economía argentina se pone de manifiesto considerando que el sector aporta más del 50% del valor total de las exportaciones y tiene una participación aproximada del 7% sobre el Producto Interno Bruto (PIB) total (INTA, 2017).

A nivel mundial, las llanuras templadas son las regiones más aptas para la producción agropecuaria. En Argentina, la Llanura Pampeana es la más explotada y parte de ella se encuentra localizada dentro de la provincia de Santa Fe, en la cual, la actividad agropecuaria es la principal fuente productiva.

INTRODUCCIÓN

Sin embargo, al ser una actividad tan sensible a las variaciones climáticas, en los últimos años pueden observarse registros de cuantiosas pérdidas tanto en las zonas rurales como semiurbanas, ocasionadas por inundaciones y sequías. Una manera de disminuir los efectos generados por la variabilidad climática es mejorar la predicción de los mismos y su efecto en el comportamiento hidrológico del sistema (más complejo que en cuencas con pendientes moderadas). Por ello, los esfuerzos para predecir con mayor exactitud cómo afectan a los sistemas de llanuras las variaciones climáticas siguen siendo un importante desafío.

Los sistemas de llanura presentan un funcionamiento hidrológico complejo producto de las bajas pendientes que preponderan en el paisaje. Estas características del terreno producen que los procesos hidrológicos verticales generalmente predominen sobre los horizontales en el balance hídrico, excepto durante períodos de excedencia hídrica extrema (Mejía, 1994). Asociado a este fenómeno de balance vertical, en las cuencas de llanura se da, en general, una marcada dependencia de la respuesta de la escorrentía al estado de humedad de la cuenca (Sallies, 1999), en especial a las variaciones del nivel freático (NF). Si bien los procesos dominantes son, en general, la evaporación y la infiltración, cuando el NF alcanza niveles cercanos a los del terreno, satura el perfil del suelo y limita la capacidad de infiltración del mismo. Esto puede ocasionar grandes excedentes superficiales ante la ocurrencia de precipitaciones incluso leves o moderadas.

La ocurrencia de precipitación sobre áreas con un perfil de suelo saturado genera un flujo superficial “de saturación”. Estas áreas saturadas se generan en depresiones del paisaje y en extensiones de la red de drenaje y se denominan áreas fuentes variables (variable Source area, VSA).

INTRODUCCIÓN

El tamaño de las mismas varía durante una tormenta; se expanden durante la precipitación y luego de esta se contraen. Esto explica, en parte, lo difícil de establecer las relaciones “simples” entre la precipitación y el escurrimiento para una cuenca de llanura (Scioli, 2016).

El flujo de saturación es el mecanismo dominante en la generación de escorrentía en pequeñas cuencas de regiones húmedas (Beven y Kirby, 1979). Se diferencia del flujo superficial "por exceso de infiltración" u “hortoniano”, que se produce cuando la intensidad de lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo. Por lo general, grandes crecidas en sistemas de llanura se corresponden a eventos donde el mecanismo del VSA's fue el principal generador de escorrentía. Ejemplos de este fenómeno son las crecidas del Arroyo del Azul (Prov. Buenos Aires) en 2002 y 2012 o la del Río Salado (Prov. Santa Fe) en 2003. En todos los casos mencionados, las cuencas antes de dichos eventos se encontraban con niveles freáticos altos, generando la saturación de los suelos.

El conocimiento sobre la dinámica y distribución espacial de las VSA's es esencial en la comprensión de los procesos hidrológicos en sistemas de llanura, al influir en la distribución espacio – temporal de la escorrentía. Fomentar el uso de modelos hidrológicos que incluyan los procesos de VSA's en la generación de escorrentía brindaría mejores resultados en la obtención de parámetros para el diseño hidráulico de obras en este tipo de áreas.

La predicción del comportamiento hidrológico de las áreas de llanura presenta una alta incertidumbre por las características del sistema. La respuesta hidrológica de estas zonas por lo general no puede ser descripta con relaciones supuestamente invariantes entre precipitación y escorrentía; debido a que intervienen procesos en la

generación de la escorrentía que son fuertemente no lineales, lo que ocasiona que la respuesta del sistema no pueda ser evaluada netamente con la observación del fenómeno hidrológico.

Generalmente se utilizan modelos matemáticos agregados y empíricos para describir los procesos precipitación – escorrentía en estos sistemas de llanura. El problema es que no todos los modelos representan adecuadamente los procesos generadores de escorrentía dominantes en las zonas de llanura. Para esta zona en particular es necesario contar con modelos hidrológicos basados físicamente y que contemplen la posibilidad de modelar largos períodos de tiempo, pudiendo esquematizar la cuenca en forma distribuida.

1.2 Estado del arte

A través de los años, en numerosos trabajos científicos se han propuesto técnicas para describir y predecir de mejor manera la distribución espacial del agua en el suelo. Algunos de los autores que trabajaron sobre esta temática son: Jackson, 1993; Larson et al., 2008; Mallick, 2009; Sayde et al., 2010; Scioli et al., 2013; Ågren et al., 2014; Kumar y Lakshman, 2015.

Una de las técnicas propuestas por diferentes estudios es la utilización de datos de sensores remotos para identificar, en grandes regiones, zonas con diferente contenido de humedad o de vegetación (Engman y Chauhan, 1995; Gao, 1996; De Alwis et al., 2007; Haas, 2010; Kumar y Lakshman, 2015). Esta información está asociada al nivel de saturación que presenta el perfil del suelo en el momento de la adquisición de la imagen.

INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad en el suelo posee una alta relación con las VSA's. Su determinación representa la condición inicial del sistema y es vital en aras de usar un modelo hidrológico (Güntner et al., 2004; Sørensen et al., 2006; Ali et al., 2014). La utilización de sensores remotos para delimitar la humedad del suelo permite obtener en forma fácil mapas de VSA's para distintos estados de saturación de la cuenca.

En esta línea, algunos autores (Yang et al., 2006; De Alwis et al., 2007) proponen obtener la variabilidad de la humedad del suelo a partir de las variaciones del verdor de la biomasa, siendo el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) el más utilizado. El NDVI constituye una buena medida de la actividad fisiológica de las plantas. Este índice proporciona registros cualitativos de densidad de cobertura vegetal global.

Otro índice muy utilizado es el Índice de Humedad Diferencial Normalizado (NDWI) (Gao, 1996). Este índice brinda información del contenido de agua foliar. Un trabajo que muestra la aplicación de este índice para la delimitación de VSA's es el de De Alwis, et al. (2007). Los autores generan los mapas de VSA's aplicando al NDWI una clasificación no supervisada. Los mapas obtenidos son comparados con los resultados del modelo hidrológico VSLF (Schneiderman et al., 2007). Los resultados de la validación muestran que la información generada con las técnicas de teledetección son adecuados para representar la distribución espacial de las áreas saturadas para las distintas coberturas del terreno.

Scioli, et al. (2013) proponen en una zona de llanura el empleo de la metodología del gráfico 2D (bi plot) entre SWIR y NDWI para la identificación de VSA's para diferentes fechas en estas áreas.

INTRODUCCIÓN

Los resultados fueron relacionados con los niveles freáticos (NF), obteniéndose una relación satisfactoria entre el área saturada y dichos niveles.

Otra técnica para predecir la distribución de agua en el suelo es la representación del sistema hidrológico con un modelo matemático para simular numéricamente los procesos físicos que rigen la dinámica hídrica del agua en el suelo. Uno de los modelos actualmente utilizados para este fin es el Soil & Water Assessment Tool (SWAT), diseñado por el Servicio de Investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA – ARS) en conjunto con la Universidad de Texas A&M (TAMU). El SWAT es un modelo hidrológico de simulación continua y semi – distribuido (Neitsch et al. , 2011). Utiliza un sistema lineal de reservorios para estimar la generación de escorrentía teniendo en cuenta los tipos de suelo, pendientes e impactos del uso del suelo (Srinivasan, 2000; Arnold y Fohrer, 2005).

El modelo SWAT determina la generación de escorrentía simulando los procesos físicos del ciclo hidrológico, con ello se puede inferir y evaluar el impacto de las prácticas de manejo de la tierra sobre los sistemas fluviales en cuencas complejas con diferentes tipos y usos del suelo a escala subdiaria, diaria, mensual o anual. El modelo requiere información espacialmente distribuida de las elevaciones del terreno, usos y tipos del suelo. Por otro lado, también requiere el ingreso de datos meteorológicos y es opcional la entrada de información del uso de pesticidas, nutrientes y crecimiento en las plantas.

El SWAT divide las subcuencas en unidades de respuesta hidrológica (HRU) y en cada una de ellas realiza el balance hídrico. Sin embargo, el SWAT no puede simular la formación de VSA's porque el modelo no satura el perfil del suelo y al no

representar correctamente el ascenso de NF (proceso fundamental para la generación de VSA's en áreas planas) la incertidumbre en la modelación aumenta significativamente. Sumado a ello, entre HRU's no existe conectividad hidráulica.

A nivel mundial, el modelo SWAT ha sido explotado en diferentes cuencas con diferentes escalas. Algunos de sus principales usos han sido: evaluación regional del flujo base y recarga del agua subterránea (Arnold y Allen, 1999), escenarios de cambio climático (Stone et al, 2001; Zhang et al., 2009), prácticas de manejo en los suelos (Gassman et al, 2007), evaluación de los impactos hidrológicos debido al uso del agua y de la tierra (Prochnow et al., 2008; Schilling et al., 2009; Villablanca, 2014; Hurtado et al., 2015), fuentes contaminantes (Schilling et al., 2009), erosión del suelo (Shen et al, 2009), determinación del potencial de energía hidroeléctrica (Kusre et al., 2010; Rospriandana y Fujii , 2017), variación en la escurrentía (Ortíz, 2010; Golmohammadi et al., 2016), modelado hidrológico de los efectos del riego (Xie et al., 2011), estimación de caudales y sedimentos (Oñate y Aguilar, 2003)

En Argentina, el modelo ha sido aplicado en distintos trabajos. Behrends, et al. (2011) aplicaron el modelo en la microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada para determinar áreas vulnerables a la contaminación por nutrientes, pesticidas y contaminantes biológicos. Brandizi, et al. (2014) implementaron el SWAT en la cuenca alta del Río Sauce para estimar los escurrimientos; obteniendo un ajuste con un error estándar normalizado mayor a 0.60. Por otro lado, Burgués, et al. (2014) utilizaron el modelo en la subcuenca del Arroyo Cañada Gómez en Santa Fe para identificar los parámetros más sensibles con sus respectivos rangos de variación la simulación del uso de fertilizantes.

Feler, et al. (2014) aplicaron el SWAT en la cuenca del Río Quequén Grande obteniendo caudales mensuales en base a simulaciones con diferentes escenarios climáticos.

Guevara, et al. (2014) aplicaron el modelo en la cuenca rural Arroyo Santa Catalina para determinar los escurrimientos de la cuenca. Una de las principales recomendaciones es el tratamiento detallado del modelo digital de elevaciones para la obtención de mejores resultados ya que errores en la topografía pueden ocasionar distorsiones locales en la generación y dirección del escurrimiento.

Por último, Havrylenko, et al. (2016) aplicaron el SWAT con el fin de evaluar sequías agropecuarias en la cuenca del Río Arrecifes en la provincia de Buenos Aires. El estudio arroja resultados aceptables a pesar de algunas limitaciones del modelo que impiden evaluar correctamente la aptitud del mismo. Además, los autores resaltan la necesidad de continuar trabajando en el análisis de la performance del modelo SWAT.

El estado del arte arroja que la mayoría de los resultados obtenidos con SWAT son aceptables y en su mayoría se adopta como herramienta de gestión de cuencas. El modelo ha representado adecuadamente la respuestas de cuencas en zonas de llanura para simulaciones continuas, aun cuando éste no representa el proceso VSA's. Esto puede ser causa de una inadecuada calibración de los parámetros del modelo, generando una compensación de errores, prediciendo adecuadamente el flujo superficial pero enmascarando problemas del modelo para representar distintos procesos hidrológicos del sistema.

INTRODUCCIÓN

Varios autores (Bosch et al., 2004; Behera et al., 2006; Luo y Zhang, 2009; Sun et al., 2017) enfatizan en la importancia de la etapa de calibración de los parámetros utilizados en el modelo SWAT, particularmente en el ajuste de los parámetros usados para la representación de los procesos de evaporación, derretimiento de nieve, flujo superficial y subterráneo.

Si bien el SWAT no representa VSA's en áreas de llanura debido a la no saturación del perfil del suelo; Easton, et al. (2008) re – conceptualiza la distribución de la escorrentía superficial mediante la modificación del método de número de curva (CN) y el contenido de agua disponible, de manera que logra representar las VSA's satisfactoriamente al incluir un índice topográfico del suelo (STI) en la programación. Sin embargo, aún con esta modificación el STI no responde adecuadamente en zonas con pendientes inferiores al 2 % (Scioli, 2016), por lo tanto, esta nueva herramienta tampoco representa este proceso predominante en zonas de llanura.

Esta tesis en primer lugar busca demostrar la importancia de las VSA's en un sistema hidrológico de llanura, a partir de la identificación espacial por medio de la validación de la metodología planteada por Scioli, et al. (2013) que aplica técnicas de teledetección en función de discriminar áreas con alta probabilidad de saturación junto con un análisis de la relación entre precipitación, NF y caudales observados. En segundo lugar, se pretende evaluar el performance de la simulación hidrológica mediante SWAT con el fin de determinar procesos o parámetros que enmascaran el error generado a partir de la no contemplación de VSA's en la configuración original del modelo.

1.3 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es aportar al conocimiento del funcionamiento hidrológico en zona de llanura contemplando las VSA's en el proceso de generación de escurrimiento y su representación en la modelación hidrológica semi distribuida.

Como objetivos particulares, se tienen:

- 1). Evaluar diferentes fuentes de información topográfica para representar adecuadamente la dirección y acumulación de agua en una zona de llanura.
- 2). Analizar la presencia de VSA's en la región de estudio por medio de herramientas de teledetección y datos hidrometeorológicos.
- 3). Analizar la implementación del modelo SWAT para representar los procesos hidrológicos en una zona de llanura.
- 4). Evaluar la incertidumbre con diferentes mapas de usos del suelo para representar los procesos hidrológicos en zona de llanura con presencia de VSA's mediante el modelo SWAT.

1.4 Organización de la tesis

En el Capítulo 1 se presentó una introducción con el fin de contextualizar el tema de tesis seleccionado, una revisión bibliográfica de investigaciones recientes en la temática y los objetivos generales y particulares.

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico de esta tesis, que incluye una descripción de los distintos mecanismos generadores de escurrimiento y las técnicas y metodologías aplicables para alcanzar los objetivos planteados.

En el Capítulo 3 se describe la cuenca experimental en cuanto a sus características generales, físicas, climáticas e información disponible.

En el Capítulo 4 se describen los materiales y las diferentes metodologías que se aplicaron en la tesis comenzando por el acondicionamiento de la topografía, seguido de las técnicas de teledetección para identificar la presencia de VSA's y posteriormente se presenta el modelo numérico utilizado.

En el Capítulo 5 se analiza y compara diferentes modelos digitales de elevación para simular correctamente el movimiento del agua en superficie en la cuenca experimental.

En el Capítulo 6 se identifican las VSA's y se caracteriza el gráfico 2D generado por la interacción del índice normalizado de contenido de humedad y la banda del infrarrojo de onda corta.

En el Capítulo 7 se aplica el modelo SWAT y se evalúa la performance del mismo con el fin de intentar representar la respuesta de la cuenca experimental.

Finalmente, en el Capítulo 8 se describen las conclusiones de esta tesis, las recomendaciones y las líneas para futuras investigaciones en la temática.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Mecanismos de generación de escorrentía

Existen diferentes mecanismos de generación de escorrentía en cuencas naturales como se observa en la Figura 2.1 (Beven et al., 2001).

- (i) *Flujo superficial por exceso de infiltración u “hortoniano”*: generado cuando la intensidad de lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo en toda la cuenca como se observa en la Figura 2.1^a (Horton, 1933). Este proceso es posible que ocurra en cuencas donde la vegetación es rara con presencia de tasas de infiltración bajas, o en cuencas muy antropizadas.

En cuencas naturales de regiones húmedas, este mecanismo puede estar confinado solamente a una porción del área de drenaje, pero no a la escala de la cuenca completa, salvo para eventos extremos. La escorrentía por exceso de infiltración en una tormenta no se produce necesariamente sobre la totalidad de la cuenca debido a la variabilidad espacial de la lluvia y de las propiedades del suelo que afectan la capacidad de infiltración.

- (ii) *Área parcial del flujo hortoniano*: Betson (1964) señala que el área que contribuye a la escorrentía por efecto de este proceso puede ser sólo una pequeña parte de la cuenca, a la que denomina “área parcial” (partial area) del flujo superficial por exceso de infiltración (Figura 2.1^b).
- (iii) *Flujo superficial de saturación o “dunneano”*: generado cuando la lluvia precipita sobre suelo saturado por ascenso del nivel freático hasta la superficie del terreno (Figura 2.1^c). Este ascenso produce una saturación

completa del perfil del suelo (VSA's) y el agua caída en estos sectores se convierte en escorrentía superficial. La importancia que tiene la generación de escorrentía por el mecanismo de saturación por el fenómeno de Areas fuentes variables en zonas de llanura repercute directamente en la cuantificación espacio temporal del escurrimiento y con ello en la *predicción de inundaciones, sedimentos, fuentes difusas de contaminación y en la gestión de cosechas.*

En cuencas de pendientes medias – altas, las VSA's se forman cuando el flujo subsuperficial se acumula en las zonas de pie de monte. En sistemas de llanura, en cambio, las VSA's se forman por ascenso del nivel freático hasta proximidades de la superficie del terreno.

- (iv) *Flujo subsuperficial – subterráneo:* compuesto por el flujo subsuperficial o hipodérmico y el aportante al caudal base de los cauces. Este mecanismo es característico en cuencas forestadas con suelos profundos y con alta capacidad de infiltración. La escorrentía superficial está restringida principalmente a los cauces (Figura 2.1^d), y la generación de escorrentía es producto del flujo subsuperficial – subterráneo que aportan a la red de drenaje.
- (v) *Flujo subsuperficial colgado:* este proceso tiene lugar en zonas escarpadas cuando existe un cambio en la permeabilidad del suelo, en general asociado a la presencia de un horizonte impermeable poco profundo. En zonas de llanura esto puede generarse por el laboreo en la actividad agrícola, el cual forma el pie de arado, compactando el horizonte B, o en zonas de sierras con presencia rocosa cercana a la superficie (Figura 2.1^e).

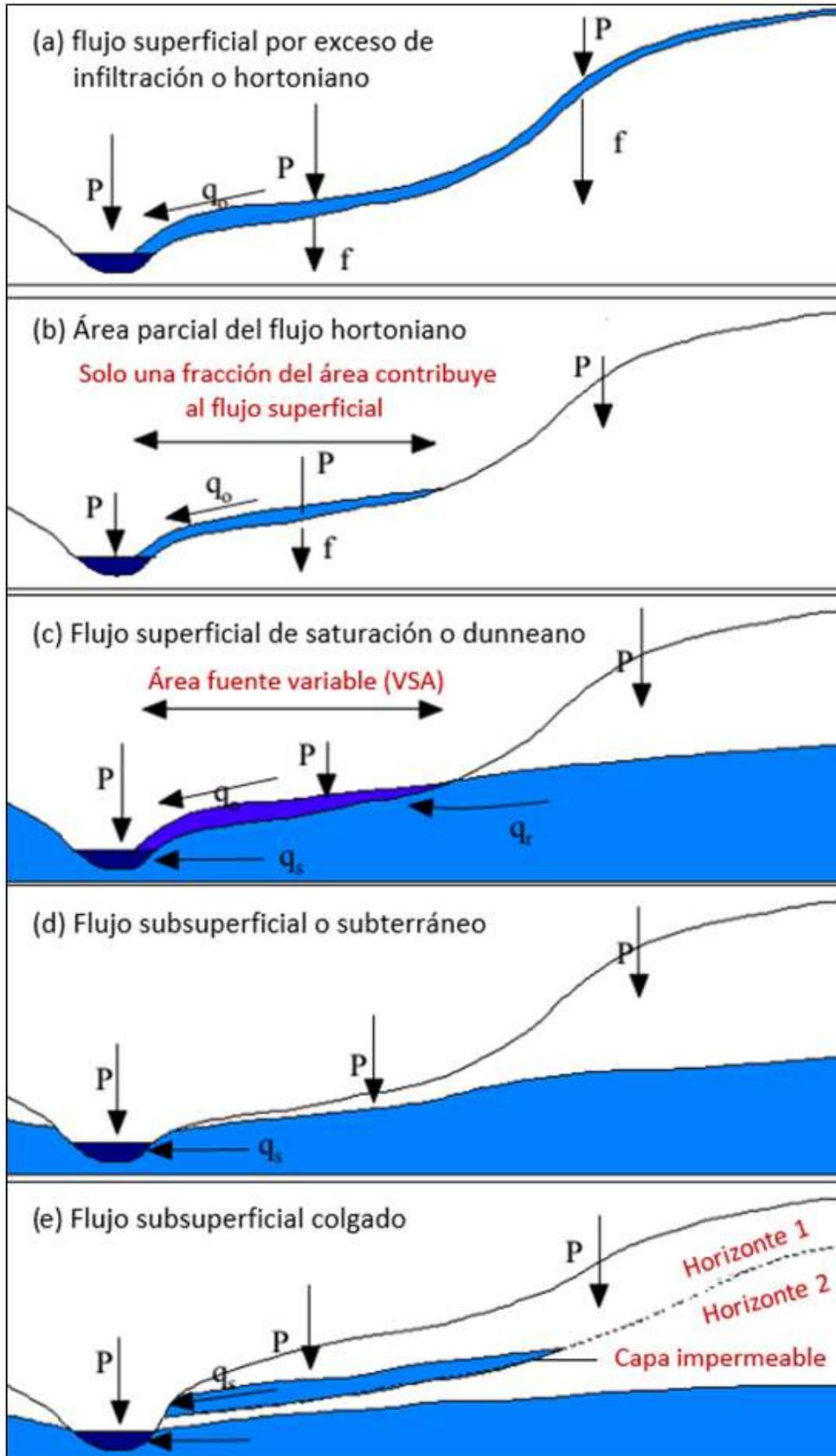


Figura 2. 1. Clasificación de los mecanismos de generación de escorrentía.

En la Figura 2.2, Dune y Leopold (1978) muestran como inciden los principales factores sobre los diversos procesos de generación de escorrentía. Éstos varían de acuerdo a la combinación entre dos grupos de factores. El primero, conformado por el clima, la vegetación y el uso del suelo (eje horizontal) y el segundo, por la topografía y el tipo de suelo (eje vertical). En las regiones áridas y semiáridas y antropizadas la capacidad de infiltración es un factor limitante y el flujo por exceso de infiltración es el mecanismo dominante en la generación de escorrentía a partir de una tormenta.

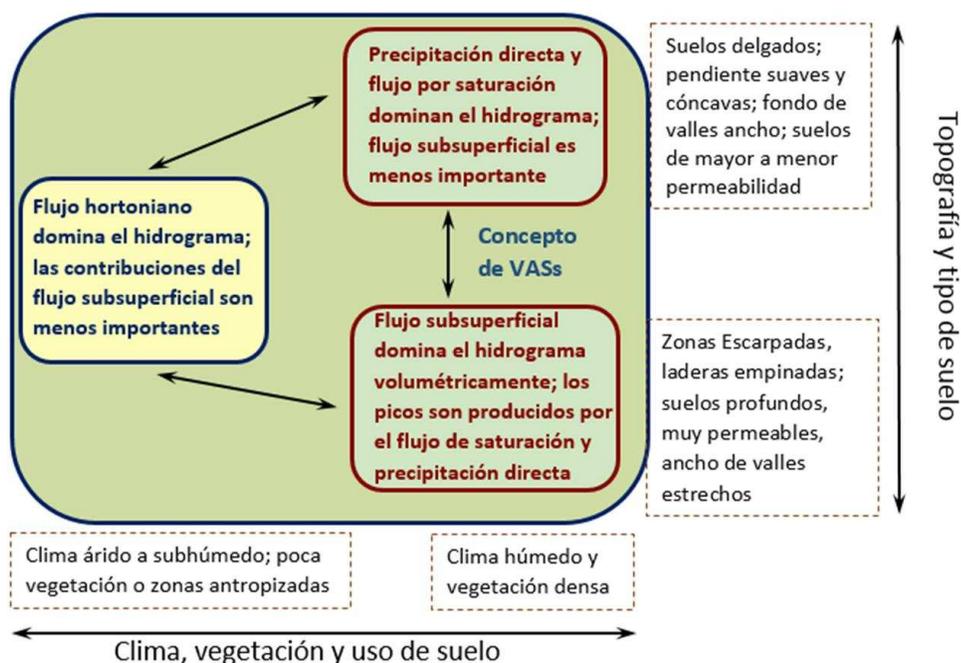


Figura 2. 2. Factores incidentes en los mecanismos de generación de escorrentía.

En cambio, en regiones más húmedas donde la infiltración no es un factor limitante, el flujo de saturación es el que domina la generación de escorrentía. A su vez, dentro de estas regiones se pueden separar los mecanismos generadores de escorrentía en flujo subsuperficial – subterráneo y flujo superficial de saturación. Además, en las regiones húmedas la importancia volumétrica del flujo subsuperficial en el hidrograma aumenta con la pendiente de la cuenca.

2.2 Modelación hidrológica

En hidrología, la simulación de los diferentes procesos hidrológicos se realiza generalmente mediante la utilización de modelos matemáticos. Por modelo se entiende la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entender y buscar su respuesta para diferentes entradas (Tucci, 1998). El modelo hidrológico es una herramienta que permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos en la cuenca hidrográfica.

Desde el punto de vista espacial los modelos hidrológicos pueden clasificarse en agregados, semi – distribuidos y distribuidos. Los primeros consideran toda el área de estudio de forma conjunta, caracterizándola con un número relativamente pequeño de parámetros y variables como por ejemplo en una cuenca hidrográfica (Refsgaard et al., 1995). En ella sus parámetros se determinan mediante una “media espacial”. Esto genera uniformidad en la cuenca ya que cada parámetro tiene un único valor. La respuesta del sistema representa el funcionamiento global del sistema, pero no brinda información de lo que ocurre dentro del mismo.

Los modelos semi – distribuidos se construyen a partir de la unión de modelos agregados (Arnold et al., 2004). Estos dividen la cuenca en subcuencas, agrupándolas en unidades de análisis donde los parámetros tienen similares características hidrológicas. Las diferentes unidades generan sus propias salidas de forma agregada y luego se unen estas salidas para conformar la respuesta del sistema completo.

Por último, los modelos distribuidos consideran explícitamente la variación espacial de la geografía y de los procesos en una cuenca (El-Nasr et al., 2005). Para esto dividen el área de estudio en porciones (celdas o grillas) y cada una de ellas tiene su propio conjunto de parámetros y sus propias variables de estado (Arnold y Eckhardt, 2001). Cada porción recibe un flujo de materia y energía de algunas de sus vecinas que a su vez trasmite a otras (Krysanova et al., 1998).

Con los modelos hidrológicos distribuidos es posible representar la respuesta hidrológica de una cuenca de manera desagregada en el espacio y tiempo. La estructura de estos modelos aportan al conocimiento del proceso precipitación – escorrentía en cualquier punto de la cuenca.

En síntesis, estos últimos modelos permiten representar explícitamente la variabilidad espacial de las características físicas de la cuenca, de las precipitaciones y de los procesos generadores de flujo. Sin embargo, una desventaja es la gran cantidad de información requerida para su implementación y la cantidad de parámetros de ajuste, lo que hace que el proceso de calibración sea una tarea muy engorrosa y difícilmente aplicable en cuencas con datos escasos.

La modelación hidrológica debe representar los mecanismos generadores del escurrimiento en la cuenca. Estos pueden ser simulados con modelos semi – distribuidos y distribuidos con diferente grado de sofisticación y rigor teórico que esencialmente cuantifiquen la humedad del suelo (Narasimhan et al, 2005).

Con el objeto de representar los distintos mecanismos de generación de escorrentía, pero con una representación simplificada y semi – distribuida, Beven y Kirkby (1979) propusieron el modelo TopModel (Topography Based Hydrological Model).

El modelo es aplicable a cuencas de relieve marcado, de escala media y contempla explícitamente la dinámica de las VSA's. Por otro lado, aparece el modelo SWAT que es fuertemente utilizado a nivel mundial porque permite representar diferentes procesos físicos en las cuencas hidrográficas, pero no contempla las VSA's.

2.3 Modelos digitales de elevaciones

Los modelos digitales (MD) se pueden definir como estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). Con este tipo de modelos pueden ser representadas diferentes variables como: uso y tipo de suelo, pendientes y otras. Los MD que se emplean para representar el relieve del terreno se denominan modelos digitales de elevación (MDE o DEM por sus siglas en español e inglés “digital elevation model”).

Los MDE se caracterizan de acuerdo a su resolución, escala, exactitud y la metodología utilizada para su generación; de acuerdo a la calidad del producto, estas características permiten que en conjunto se realice un análisis eficiente de la información. La Resolución se refiere al nivel de detalle, atribuido por la unidad de medida más pequeña que se adopta para registrar los datos. La escala es una relación de proporcionalidad entre distancias medidas en el terreno y sus correspondientes en un mapa (Strahler et al, 1989). Permiten distinguir un estudio regional con escala 1:100.000 de uno con un alto nivel de detalle con escala 1:5.000. La exactitud de un MDE está dada por la cantidad de errores aleatorios o sistemáticos que tenga el producto, una manera de mejorar la exactitud es tener puntos de control en tierra (Ground Control Points, GCP) que eviten errores si se interpolan los datos (Mailing, 1989; Weibel y Heller, 1991; Cressie, 1993).

El MDE es un recurso importante en el modelado de cuencas hidrográficas, inclusive que se le atribuye mayor preponderancia en las zonas de llanura en donde es vital representar la dinámica hídrica correctamente a partir de la representación de la geomorfología y aspectos topográficos. Igualmente, en el modelado de cuencas, la utilización de un MDE debe tener en cuenta variables que puedan afectar el flujo; ya se una obra hidráulica, cualquier modificación antrópica existente de acuerdo a las necesidades de la actividad agropecuaria o con mayor importancia: la consideración de la red de canales que drenen la cuenca. Lo anterior debido a que se modifica el comportamiento de la esorrentía que repercute directamente en el proceso de generación y acumulación de agua en la cuenca hidrográfica.

La representación digital de la topografía ha sido cada vez más usada en la modelación hidrológica y en el gerenciamiento de los recursos hídricos. Esto se debe a que provee información asociada a las coordenadas del terreno (Martz y Garbrecht, 1992). Diferentes técnicas y procedimientos se utilizan para desarrollar los MDE, siendo las más comunes (por la disponibilidad de datos): la digitalización de los mapas topográficos e interferometría radar. Todas las metodologías tienen como objetivo describir la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados. La digitalización de los mapas topográficos es lenta y trabajosa, y la precisión depende de la escala del mapa y la equidistancia de las curvas de nivel. La interferometría radar consiste en obtener interferogramas con las imágenes de radar, tomadas al mismo tiempo desde lugares diferentes. Esta técnica es bastante precisa y su resolución espacial depende de las imágenes radar. Una vez obtenidos los datos de altitud del terreno se procede a la construcción del MDE, esto implica llegar a una matriz regular interpolando los datos de elevación.

Uno de los MDE más utilizados actualmente es el generado por interferometría de radar a partir de la información capturada por la misión “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRTM). La misión SRTM fue un proyecto conjunto entre la *National Geospatial – Intelligence Agency (NGA)*, la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* y las *Agencias Espaciales de Alemania (DLR)* e *Italia (ASI)*, lanzada en febrero del 2000. Este MDE brinda valores de elevación digital para el 80% de la superficie de la Tierra, los cuales están expresados en metros al geoide WGS84 y EGM2008.

El SRTM está disponible en la web (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) para la zona de Argentina con una resolución espacial de 30 y 90 [m]. El modelo, al tener esta resolución, no identifica cambios en el relieve del terreno que se desarrollan en escasos metros. Un canal o ruta de 10 [m] de ancho no puede ser representado con esta escala.

El modelo presenta los valores altimétricos de cada celda como números enteros, ocasionando una pérdida de la precisión. En otras palabras, el truncamiento de estos decimales genera que el mínimo desnivel entre dos celdas adyacentes de diferente cota sea de 1 [m]. El modelo presenta errores en la representación de depresiones con agua y arboledas. Las superficies con agua son identificadas por el modelo pero las elevaciones determinadas para esas áreas no son correctas (Scioli et al, 2007).

Los montes o arboledas son representados como elevaciones del terreno porque el método de interferometría de radar utilizado para la construcción del SRTM no logra diferenciar la superficie de las copas de los árboles de la del terreno (Rodriguez et al, 2006).

Otros MDE globales que han empezado a tener utilidad son los denominados GDEM II (<https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/>), ALOS PALSAR y ASTER.

El GDEM II está construido a partir de estereoscopía de las bandas 3N (Nadir) y 3B (Back) de imágenes satelitales ASTER. Este modelo tiene una resolución de 30 [m] y logra representar de manera satisfactoria la morfología del terreno con limitaciones. Por ser generado a partir de imágenes satelitales, discrimina caminos, potreros, rutas, ríos y otros elementos del paisaje. Las versiones lanzadas en 2011 y 2013 presentan incongruencias en la medición de elevaciones, generando errores significativos en la zona de llanura. Por el momento, no es aconsejable la utilización de este MDE como base topográfica para modelos de hidrología en zonas de bajo relieve.

El MDE ASTER (creado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón conocido por sus siglas METI), utiliza una banda espectral infrarroja que genera imágenes estéreo, con una relación de altura base de 0.6 (Tachikawa et al, 2011). Posee resolución espacial de 30 [m] y cuenta con una precisión vertical de ± 17 [m] (Mukherjee et al, 2013).

El ALOS PALSAR está construido en base a datos observados por radar (SAR) y posee una resolución de 12.5 [m]; este MDE permite representar las geoformas pero con cierto grado de sobreestimación a diferencia del ASTER que no alcanza a siquiera delinear las zonas con hoyas de deflación y por el contrario sobreestima la red de drenaje (Guevara et al, 2019).

El SRTM se ha usado en numerosos estudios hidrológicos como base topográfica con resultados aceptables (Hunter, 2006; Scioli y Villanueva, 2011; Sharma y Tiwari., 2014; Guevara et al, 2019).

Guevara, et al. (2019) evalúan la precisión vertical y utilización de diferentes MDE para la representación de procesos hidrológicos y concluyen que la información topográfica que aporta el SRTM es valiosa para la aplicación hidrológica siempre que haya sido evaluado y caracterizado correctamente el error o incertidumbre que tienen los datos de elevación en la región de estudio.

Además, estos autores cuantificaron el error al utilizar un MDE SRTM aplicando los métodos “IDW” y “ANUDEM”; obtuvieron un aumento de la precisión del modelo en un 33% a partir del SRTM sin procesar (RMSE: ± 4.44 [m] y ± 3.2 [m] para los modelos no corregidos y corregidos, respectivamente) (Guevara et al, 2019).

Actualmente esta información es utilizada para la representación del relieve en zonas de llanura. Sin embargo, la aplicación del SRTM en estas regiones no es directa. Es necesario realizar ciertas correcciones en los valores de elevación para representar correctamente la topografía.

La aplicabilidad del SRTM en zonas planas fue evaluada por Scioli, et al. (2007) quienes demostraron que el mencionado MDE representa correctamente la superficie del terreno con un grado de detalle aceptable para estudios hidrológicos en áreas de llanura, siendo éste más representativo que uno creado a partir de las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con equidistancia de 2.5 [m].

Igualmente, en estas zonas de llanuras el SRTM no representa la mayoría de los cauces naturales y artificiales porque éstos son “cortes” de pocos metros de ancho y profundidad en un terreno plano (Scioli y Villanueva, 2011).

En varios trabajos se corrigieron o modificaron los valores de elevación del MDE SRTM para mejorar la representación del relieve del terreno para estudios hidrológicos en áreas de llanura.

Scioli (2009) realizó ajustes topo altimétricos a un SRTM para aplicarlo a una modelación hidrológica distribuida. Como resultado, logro reproducir adecuadamente la escorrentía superficial en una cuenca de llanura.

Badano (2010) utilizó el SRTM para mejorar la representación de depresiones superficiales dentro de las celdas de un modelo hidrológico distribuido, logrando identificar de forma adecuada las áreas inundadas.

Yamazaki, et al. (2012) realizaron ajustes de la elevación del SRTM para aplicarlo a una modelación hidrodinámica en planicies de inundación obteniendo resultados satisfactorios por el alto ajuste en las improntas de inundación.

Por lo anterior, los trabajos mencionados muestran que ajustando el MDE se obtienen resultados satisfactorios. La modificación y corrección del SRTM se realiza con respecto a datos de elevación de campo, imágenes satelitales o vectores de rutas, caminos y canales.

2.4 SIG en la modelación hidrológica

Un *Sistema de Información Geográfica (SIG)* es una herramienta eficaz para el almacenamiento, integración, procesado y análisis de información. Esta herramienta permite representar en forma simple la distribución espacial de cualquier variable. Al tener vinculados los datos a un sistema de referencia, estos pueden superponerse o cruzarse entre sí para optimizar la explotación de la información.

En los últimos años, la utilización de los SIG como herramienta de apoyo para la modelación hidrológica ha aumentado de manera significativa. Los SIG y modelos hidrológicos tienen una fuerte dependencia de los datos espaciales, por lo que resulta lógico integrarlos en una única herramienta.

La gran capacidad de los SIG para manejar información espacial ha llevado a su consolidación como herramientas adecuadas para afrontar de forma eficiente la modelización hidrológica (Quiñonero et al, 2007). Dependiendo del grado de relación entre estas dos herramientas podemos diferenciar tres niveles de integración.

En un primer nivel están los SIG y modelos utilizados de manera complementaria, donde los SIG se utilizan como una simple herramienta para el procesado de datos de entrada y para hacer representaciones cartográficas de los resultados.

El SIG y el modelo hidrológico son sistemas separados, que comparten un mismo formato de archivos fichero de importación/exportación de datos. Un ejemplo de esto son las primeras herramientas creadas por Olivera y Maidment (1999) para ArcView que generan los archivos de entrada que necesita el modelo hidrológico HEC – HMS (Feldman, 2000).

Un segundo nivel considera la integración de dos sistemas separados, los cuales comparten una interfaz de usuario, los formatos de archivo y el espacio de memoria. En este nivel se puede mencionar el software Watershed Modeling System (AQUAVEO, 2019) que integra un SIG con modelos hidrológicos como el HEC – HMS, GSSHA (Downer y Ogden, 2004), TR-55, HSPF, TR – 20, MODRAT, entre otros.

Por último, el tercer nivel es una integración total donde el modelo y el SIG son un único programa. Un ejemplo de este nivel es el programa MODULUS (Engelen, 2000).

En todos los casos presentados de integración, los SIG cumplen con la función de facilitar la implementación del modelo y el análisis de los resultados (Kopecký y Čížková, 2010; Sharma y Tiwari, 2014). El proceso de calibración y validación de modelos hidrológicos, especialmente modelos distribuidos, mejora con el uso de estos sistemas (Scioli y Villanueva, 2008; Badano, 2010).

Los SIG se han convertido en una herramienta de uso cotidiano para el modelista, ya que con ellos se vincula todo tipo de información en un mismo marco de referencia espacial. La vinculación simple de datos con una referencia espacial proporciona rapidez para generar mapas temáticos, informes y tablas de resultados que hacen que la utilización de esta herramienta sea cada vez más aprovechada por distintas ciencias. A este respecto, el continuo avance tecnológico brinda nuevas metodologías que amplían el campo de utilización de esta herramienta.

2.5 Teledetección en la hidrología

La *teledetección* estudia e interpreta las propiedades de un objeto en la superficie terrestre a partir de datos adquiridos de aeronaves o satélites. Es decir, permite obtener información de los elementos a una determinada distancia sin tener la necesidad de estar en contacto con el mismo.

Esta disciplina permite monitorear grandes regiones y cuantificar el flujo de energía que proviene de distintos objetos. Con esta información es posible identificar la presencia, el estado y comportamiento de elementos y variables naturales.

Las principales aplicaciones del uso de esta información son: monitoreo, detección de cambios climáticos globales, agricultura, exploración de recursos naturales, cartografía, evaluación ambiental, entre otros.

Actualmente la aplicación de la teledetección como herramienta ha aumentado considerablemente en el campo de la hidrología debido al avance tecnológico y al desarrollo de sensores especializados utilizados para monitorear y cuantificar variables específicas como la temperatura, humedad de la superficie de la tierra, cobertura de nieve / hielo, vegetación, relieve, precipitación y otras.

Diferentes estudios proponen la utilización de datos de sensores remotos para identificar, en grandes regiones, zonas con diferente contenido de humedad o de vegetación (Engman y Chauhan, 1995; Gao, 1996; De Alwis et al., 2007; Haas, 2010; Kumar y Lakshman, 2015). Esta información está asociada al nivel de saturación que presenta el perfil del suelo en el momento de la adquisición de la imagen.

La determinación del contenido de humedad del suelo es esencial para la implementación de los modelos hidrológicos, debido a que representa una de las condiciones iniciales del sistema. El estado de esta variable cobra una mayor importancia en simulaciones donde es de interés reproducir los distintos mecanismos generadores de escorrentía que dependen del grado de saturación de los suelos.

Los trabajos de Güntner, et al. (2004), Sørensen, et al. (2006) y Ali, et al. (2014) muestran que el contenido de humedad de los suelos tiene una alta relación con las VSA's. Estos autores correlacionan el I_{Top} (índice topográfico) y sus variantes con mapas de humedad de suelo observados. El problema que surge para relacionar estas variables es que la humedad del suelo es dinámica (función de la saturación de la cuenca) mientras que los índices son estáticos (dependen de la topografía).

Estas relaciones se obtuvieron para un estado de humedad de la cuenca determinado. Sin embargo, los autores concluyen que la utilización de sensores remotos para delimitar la humedad del suelo permite obtener en forma fácil y correcta mapas de VSA's para distintos estados de saturación de la cuenca.

Otra manera de obtener la variabilidad de la humedad del suelo es el estudio de las variaciones del verdor de la biomasa. El NDVI constituye una buena medida de la actividad fisiológica de las plantas. Este índice proporciona inclusive registros cualitativos de densidad de cobertura vegetal global.

En cambio, el Índice de Humedad Diferencial Normalizado, NDWI (Gao, 1996) es sensible a los cambios en el contenido de agua líquida de la cobertura vegetal y se obtiene a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR). El SWIR refleja tanto los cambios de contenido de agua en la vegetación como los cambios en la estructura del mesófilo esponjoso, mientras que el NIR es afectado por la estructura interna de la hoja y su contenido de materia seca, pero no por el contenido de agua (Ceccato et al, 2001). El NDWI está fuertemente relacionado a la cantidad de agua por unidad de superficie (Tucker, 1980; Ceccato et al, 2001; Fensholt y Sandholt, 2003). Teniendo en cuenta lo anterior es factible utilizarlo para la identificación de VSA's.

Un trabajo que muestra la aplicación de este índice para la delimitación de VSA's es el de De Alwis, et al. (2007). Los autores generan los mapas de VSA's aplicando al NDWI una clasificación no supervisada. Los mapas obtenidos son comparados con los resultados del modelo hidrológico VSLF (Schneiderman et al., 2007) y concluyen que la información generada con técnicas de teledetección es adecuada para representar la distribución espacial de las áreas saturadas.

Capítulo 3

Cuenca Arroyo las Prusianas

3.1 Descripción general

El área de estudio corresponde a la cuenca Arroyo las Prusianas, Provincia de Santa Fe (Figura 3.1). La cuenca tiene una superficie de aproximadamente 569 [km²], una longitud del cauce de aproximadamente 26 [km] y un desnivel máximo de 69 [m]. La cuenca posee características fisiográficas representativas de una zona de la Llanura Pampeana, con pendiente media inferior al 2% que se extiende hacia el este en donde predominan paisajes de valles e interfluvios generados por la dinámica hídrica reciente (Kröhling y Brunetto, 2013). Por la baja pendiente; los flujos verticales del agua son preponderantes sobre los horizontales, es decir los procesos de precipitación, infiltración, evapotranspiración y otros predominan a los flujos superficial, subsuperficial y subterráneo (Scioli, 2016).

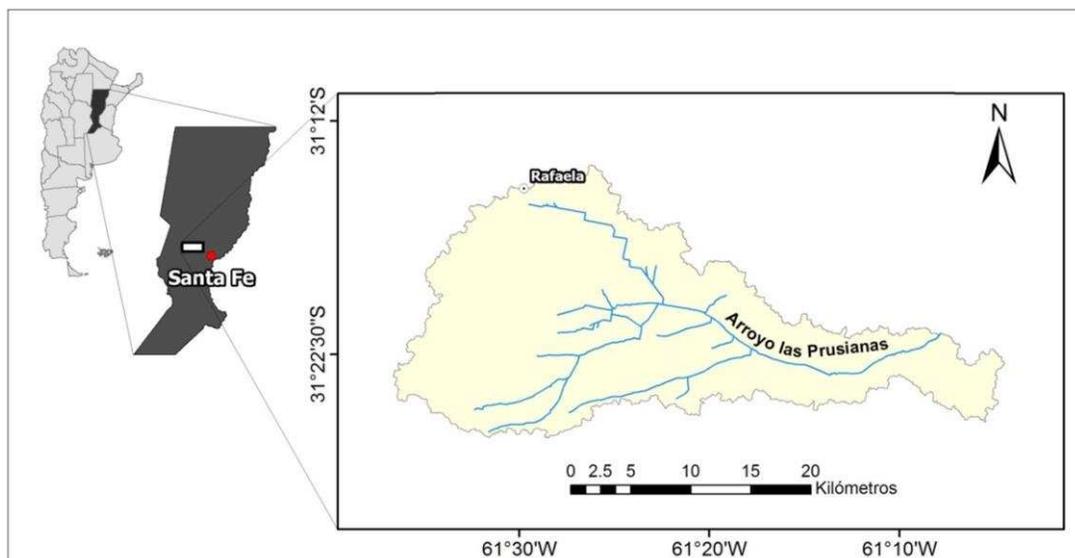


Figura 3. 1. Cuenca Arroyo las Prusianas.

A partir de los registros históricos del período 1930 – 2015, en la estación R87359 del INTA RAFAELA, la región tiene una precipitación media anual de 951.8 [mm]. El periodo más lluvioso del año medio se presenta desde el mes de octubre hasta abril. Teniendo en cuenta la clasificación climática de Thornthwaite (1948); el clima se clasifica como subhúmedo – húmedo mesotermal, con poca o nula deficiencia de agua.

En la cuenca se alternan procesos de inundaciones y sequías que afectan el desarrollo socio económico de la región (Sala et al, 1987). En períodos de estiaje, el Arroyo las Prusianas es netamente alimentado por agua subterránea y puede llegar a secarse. En periodos de crecidas, el caudal puede variar de unos pocos [m^3/s] a más de 100 [m^3/s], variando los tiempos de respuesta de la cuenca en función de la intensidad del evento y el estado de humedad antecedente de la misma.

La cuenca se compone de materiales de baja permeabilidad a nivel subsuperficial (limos y arcillas) con la existencia de geoformas de origen fluvial como paleocauces, bañados, cañadas y también depresiones de origen eólico (hoyas de deflación); que mantienen un régimen de humedad variable en el tiempo según la época del año hidrológico. En el actual Plan Director de los Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (Collins et al, 2012), el área de estudio presenta un crecimiento de cultivos de maíz, soja, sorgo y trigo, que pasaron de representar el 31 al 44% de la producción agrícola total de la región. Por consiguiente, es importante estudiar el comportamiento hidrológico de la cuenca para evitar pérdidas económicas futuras. La cuenca posee datos de precipitaciones y niveles freáticos, además, se encuentra monitoreada desde el año 2008 y hace parte de la red de alerta del Río Salado que responde al actual Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos.

3.2 Hidrometeorología

3.2.1 Información pluviométrica

La región posee un régimen pluriannual de precipitaciones, que implica la alternancia de períodos de varios años secos, húmedos e intermedios, afectando en gran medida el desarrollo socio – económico de la región. Los períodos de déficit hídrico están caracterizados con persistentes sequías, elevadas temperaturas y alta evapotranspiración. En tanto, los regímenes de excesos de larga duración se caracterizan por generar áreas anegadas con una periodicidad no definida pero mayor al año y con una permanencia del escurrimiento superficial superior al mes (Caamaño et al, 1979). Estos fenómenos acarrear graves daños y severas limitaciones para la producción agrícola – ganadera de la zona.

La zona en estudio y área de influencia cuenta con una serie histórica de precipitaciones desde el año 1930 determinadas por el pluviómetro instalado en la estación agrometeorológica R87359 del INTA. La Figura 3.2 presenta las medias mensuales para el periodo 1930 – 2015 en donde se evidencian los meses de concentración de lluvias (octubre – abril).

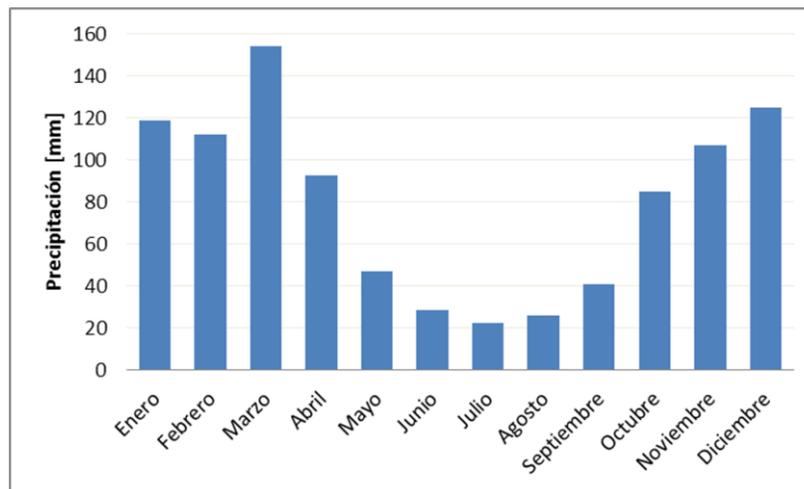


Figura 3. 2. Medias mensuales de precipitación para el periodo 1930-2015.

La estación R87359 del INTA resaltada en la Figura 3.3 es de tipo meteorológica y posee los registros más confiables y completos del área en estudio. En esta estación, además de la obtención del registro de precipitación, también se obtuvieron las series históricas de temperaturas máximas y mínimas (1956 – 2018), humedad relativa (1985 – 2018), velocidad del viento a 2 [m] (2010 – 2018), lluvia máxima en media hora y otras variables requeridas por el modelo SWAT para su correcta aplicación.

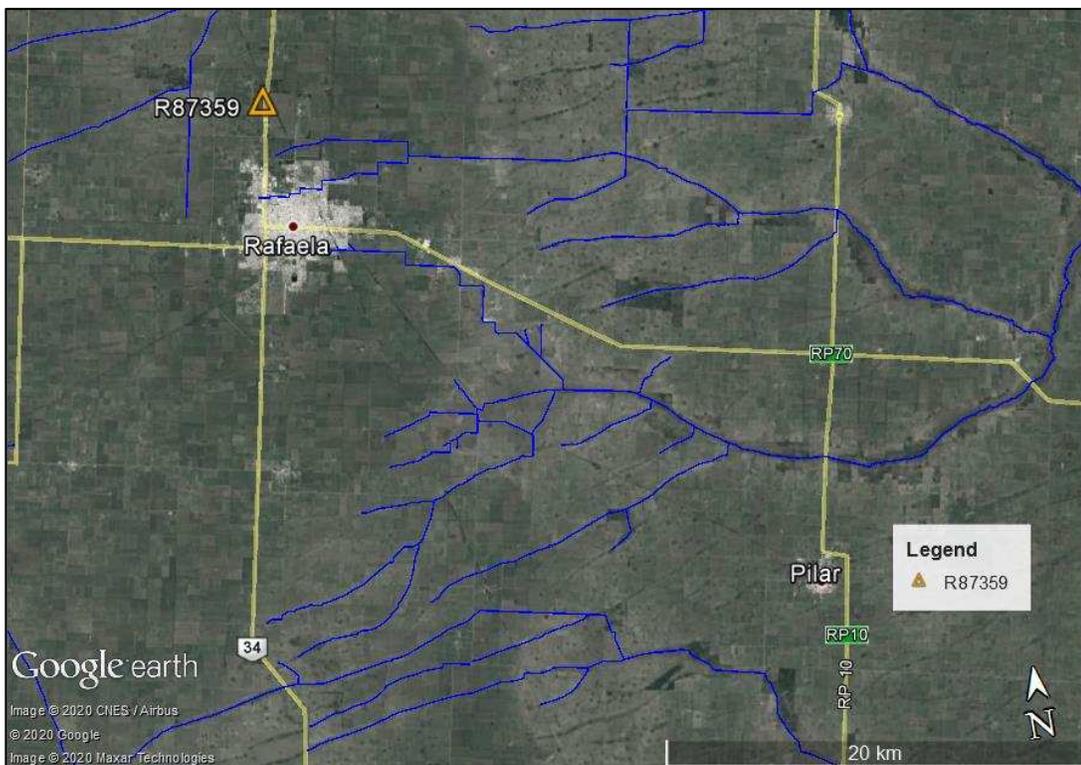


Figura 3. 3. Estación Agrometeorológica R87359 INTA Rafaela.

3.2.2 Datos de caudales

El Arroyo las Prusianas cuenta con 2 secciones de control ubicadas sobre la Ruta Provincial 10 y aguas abajo a 10 [km] (Figura 3.4). En estas locaciones, el

actual Ministerio de Infraestructura y Transporte de la Provincia de Santa Fe suministró los caudales a partir del año 2008 hasta el 2018 (curva H-Q).

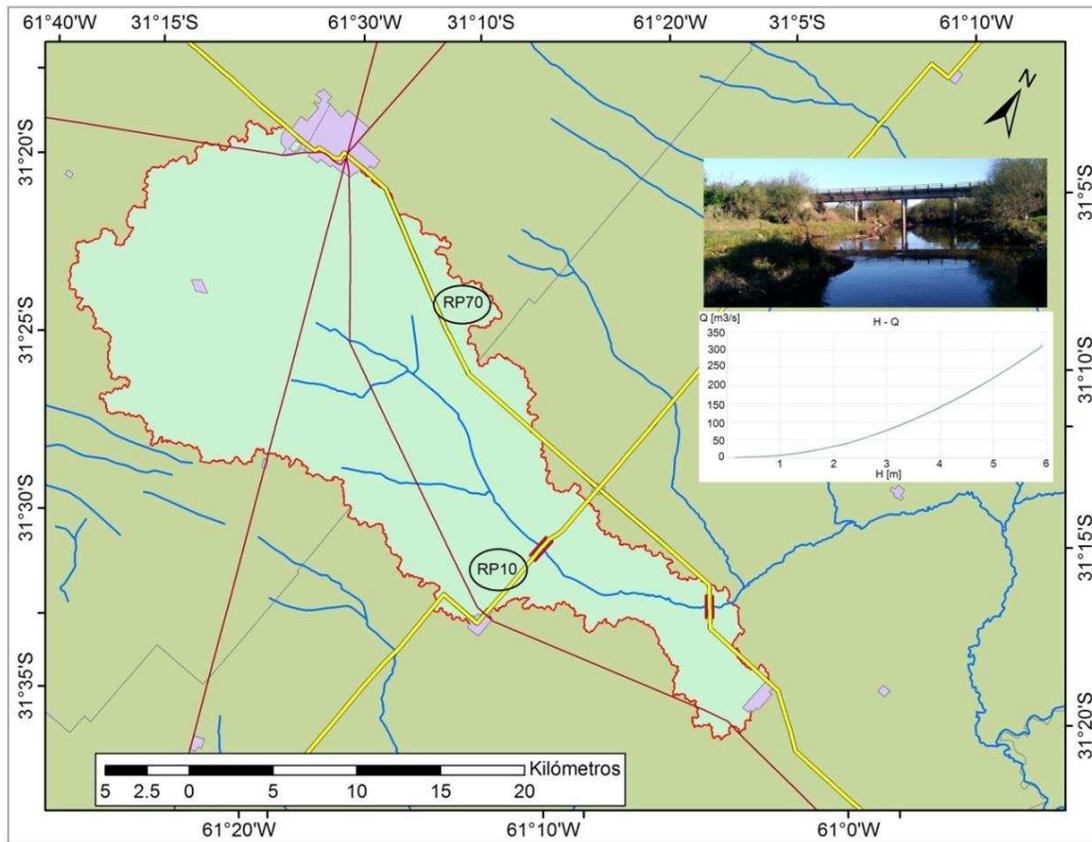


Figura 3. 4. Localización de las secciones de control sobre el Arroyo las Prusianas.

3.2.3 Demostración no linealidad entre el proceso de precipitación-escorrentía

Para demostrar la aparición del fenómeno de VSA's en la cuenca Arroyo las prusianas se presentan a continuación 4 eventos en concreto para visualizar la fuerte no linealidad que existe entre la precipitación neta y el caudal. Cabe resaltar que la profundidad del nivel freático (PNF) es medida en la estación agrometeorológica del INTA Rafaela, la cota base (CB) de la estación es 60.7 [m]. Los valores presentados en color rojo de la columna PNF simbolizan agua por encima de la superficie.

En la Tabla 3.1 y Figura 3.5 se presenta la información del evento que tuvo lugar desde el 03/02/2014 hasta el 06/02/2014. Se caracterizó por generar un ascenso del NF de medio metro a pesar que el caudal observado fue netamente flujo base.

Tabla 3. 1. Evento de análisis mes de febrero del 2014.

Fecha	Q _{obs} [m ³ /s]	Precipitación [mm]	Prof. Nivel freático [m]
03/02/2014	0.52	41	2.68
04/02/2014	0.55	70	2.28
05/02/2014	0.76	0	2.04
06/02/2014	0.95	0	2.17

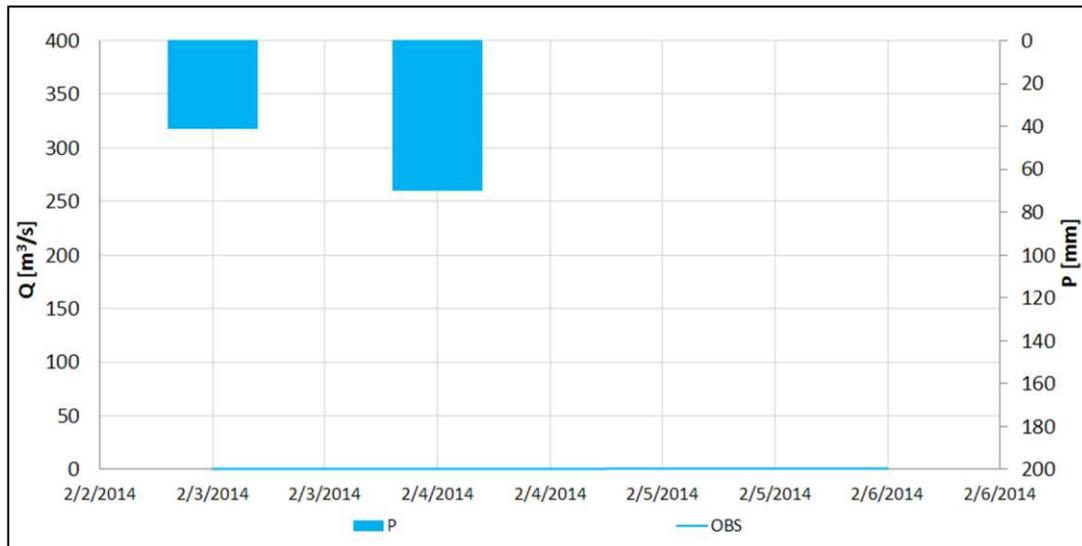


Figura 3. 5. Evento de análisis febrero del 2014.

Por otro lado, en febrero y marzo del 2015 (Tabla 3.2 y Figura 3.6) sucedieron dos eventos de precipitación importantes similares en magnitud (25/02/2015: 112 [mm] y 03/03/2015: 114 [mm]). Estos eventos produjeron diferentes caudales picos por encima de los 100 [m³/s] en el cierre de cuenca.

Además, estos eventos provocaron que el NF estuviera por encima de la superficie, inundando alrededor de 300.000 [ha] de campos y causando millonarias pérdidas económicas (Nuestro Agro, 2015).

Tabla 3. 2. Eventos de análisis meses de febrero y marzo del 2015.

Fecha	Q _{obs} [m ³ /s]	Precipitación [mm]	Prof. Nivel freático [m]
25/02/2015	15.35	112	0.47
26/02/2015	67.11	0	0.11
27/02/2015	108.82	0	0.14
28/02/2015	85.81	0	0.12
Fecha	Q _{obs} [m ³ /s]	Precipitación [mm]	PNF [m]
01/03/2015	76.07	54	0.12
02/03/2015	78.98	0	0.03
03/03/2015	113.45	114	0.08
04/03/2015	167.8	0	0.01
05/03/2015	124.6	0	0.01
06/03/2015	87.7	0	0.03

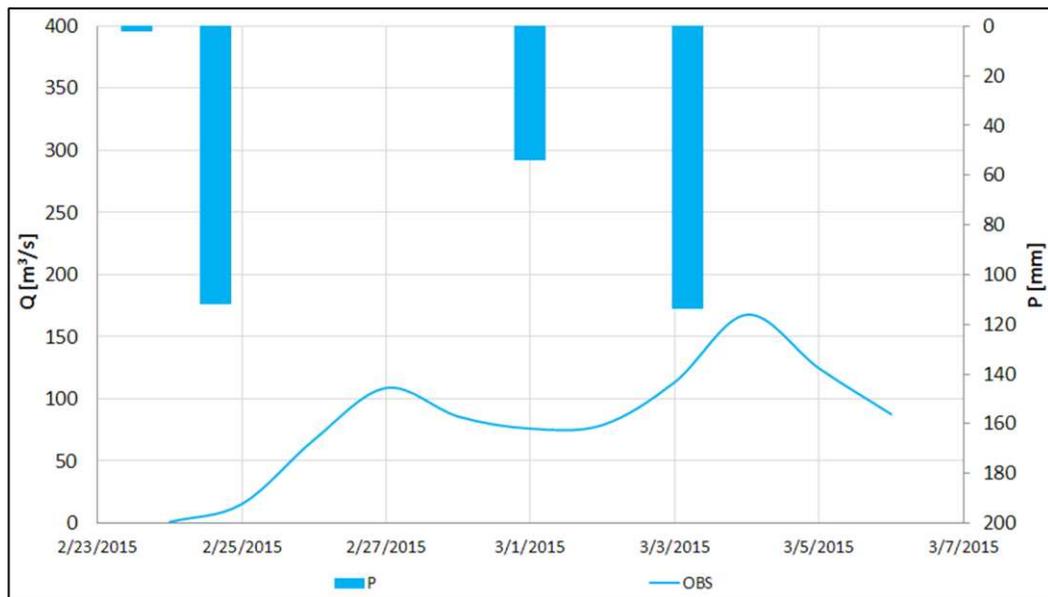


Figura 3. 6. Eventos de análisis meses de febrero y marzo del 2015.

Por otro lado, en el año 2018 hubo eventos de precipitación que superaron los 100 [mm] y el caudal siguió siendo netamente flujo base a pesar que el NF aumentó significativamente. Por ejemplo, el evento que tuvo lugar desde el 13/09/2018 y culminó el 17/09/2018 precipitaron más de 200 [mm] y los caudales registrados no superaron el metro cúbico, pero el nivel freático ascendió 1.33 [m] (Tabla 3.3 y en la Figura 3.7).

Tabla 3. 3. Evento de análisis mes de septiembre del 2018.

Fecha	Q _{obs} [m ³ /s]	Precipitación [mm]	Prof. Nivel freático [m]
13/09/2018	0.61	105	2.85
14/09/2018	0.77	87	1.99
15/09/2018	0.74	23	1.96
16/09/2018	0.67	0	1.74
17/09/2018	0.56	0	1.52

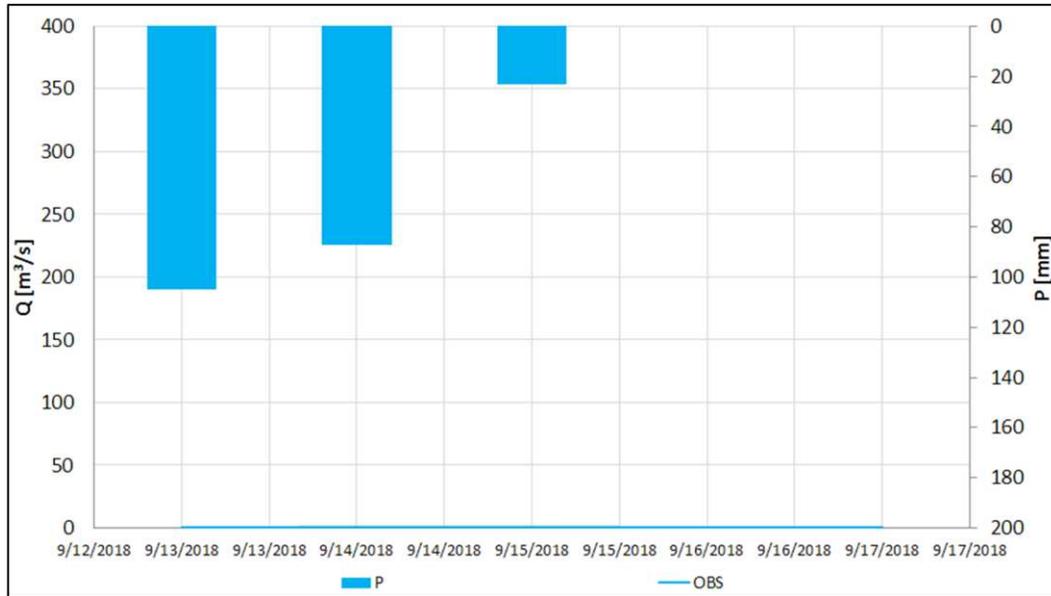


Figura 3. 7. Evento de análisis mes de septiembre del 2018.

Por lo anterior, se logró demostrar que el comportamiento de la cuenca es fuertemente no lineal. Eventos con intensidades de precipitación de 100 [mm] produjeron tasas de caudal por encima de los 100 [m³/s] y por otro lado, eventos de precipitación con similar intensidad (100 mm) no generaron caudales significativos en el cierre de cuenca (<1 m³/s). Por lo cual, se opta por dividir la serie de datos en un periodo sin y con presencia del fenómeno (técnica de calibración del modelo). El periodo entre 2009 – 2013, que no presentó el fenómeno de VSA's; se utilizó para realizar la calibración y a partir del año 2014 hasta el 2018 se ejecuta la validación.

3.3 Información freaticométrica

Los datos de profundidades freáticas fueron obtenidos de la estación experimental R87359. La cual tiene una elevación de 60.7 [m] y la frecuencia de muestreo es diaria, lo que permite mejorar la representación de la variación temporal de la freática en la zona. La información se encuentra disponible a partir del año 1970 hasta finales del año 2018. La Figura 3.8 expone el perfil del nivel freático promedio anual en [m] junto con la cota de la superficie del terreno.

Se puede observar que en la década de los 70's hubo un importante ascenso del nivel freático de 11 [m] y posteriormente la napa no volvió a situarse a profundidades mayores de los 7 [m]. Actualmente el nivel freático (NF) oscila entre la superficie y los 2 [m] de profundidad y sumado a la componente precipitación, existen otras razones por las cuales la napa es tan dinámica. Algunas son el estado de saturación de la cuenca y la relación directa entre los cultivos y sus consumos (P. ej. soja).

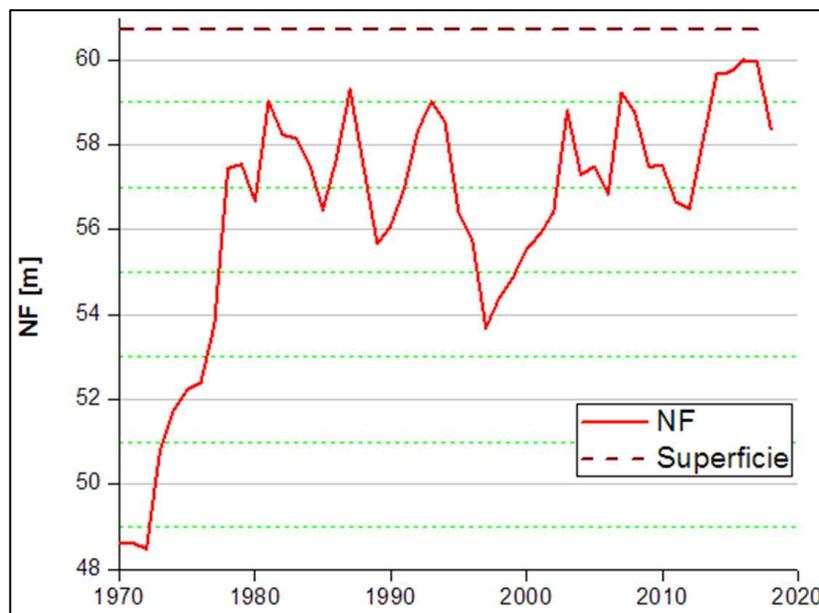


Figura 3. 8. Perfil del nivel freático promedio anual [m].

3.4 Geología y suelos

Según el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR, 2012), la geología de la cuenca Arroyo las Prusianas se deriva a dos edades (Figura 3.9). La formación “*Qe2*” del Holoceno que se caracteriza por una litología de depósitos eólicos – lacustres, arcillo – limosos y arcillosos con una extensión de 134 [km²] y un ambiente del Pleistoceno “*Qe1*” con depósitos eólicos limo – arenosos y limosos de 435 [km²].

La dinámica hídrica de la cuenca es gobernada principalmente por factores climáticos y geológicos. Los factores climáticos que afectan la dinámica hídrica se ven complementados con la estructura del perfil de suelo y su litología característica que permite que la cuenca aumente su interacción con la freática (Kröhling y Brunetto, 2013).

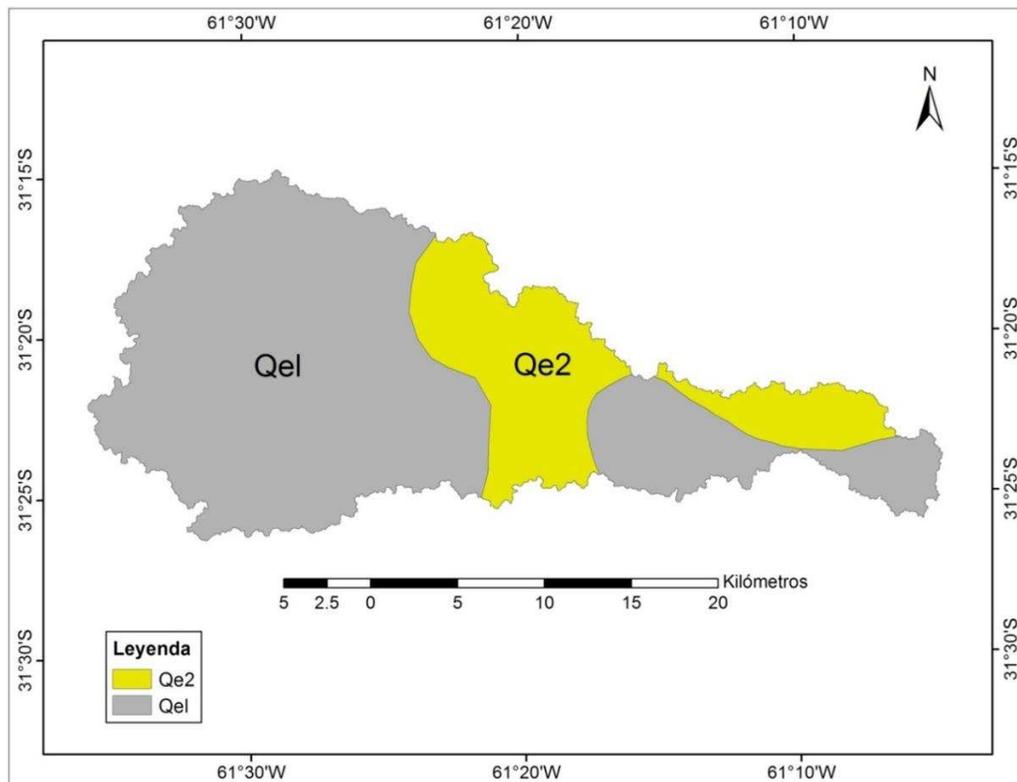


Figura 3. 9. Geología de la cuenca Arroyo las Prusianas.

CUENCA ARROYO LAS PRUSIANAS

Los tipos y características fisicoquímicas de los suelos, se obtienen a partir del INTA, correspondientes al relevamiento semidetallado (E: 1:50.000) de los suelos en la provincia de Santa Fe realizado entre los años 1965 – 1998. Esta caracterización de suelos provee la clasificación según la “*Soil Taxonomy*”.

El mapa presentado en la Figura 3.10 se encuentra disponible en el “*Catálogo GeoINTA*” (INTA, 2014). Las cartas ofrecen información y distribución sobre propiedades de los suelos, su capacidad de uso y normas generales para su manejo y conservación (Giorgi et al, 2010).

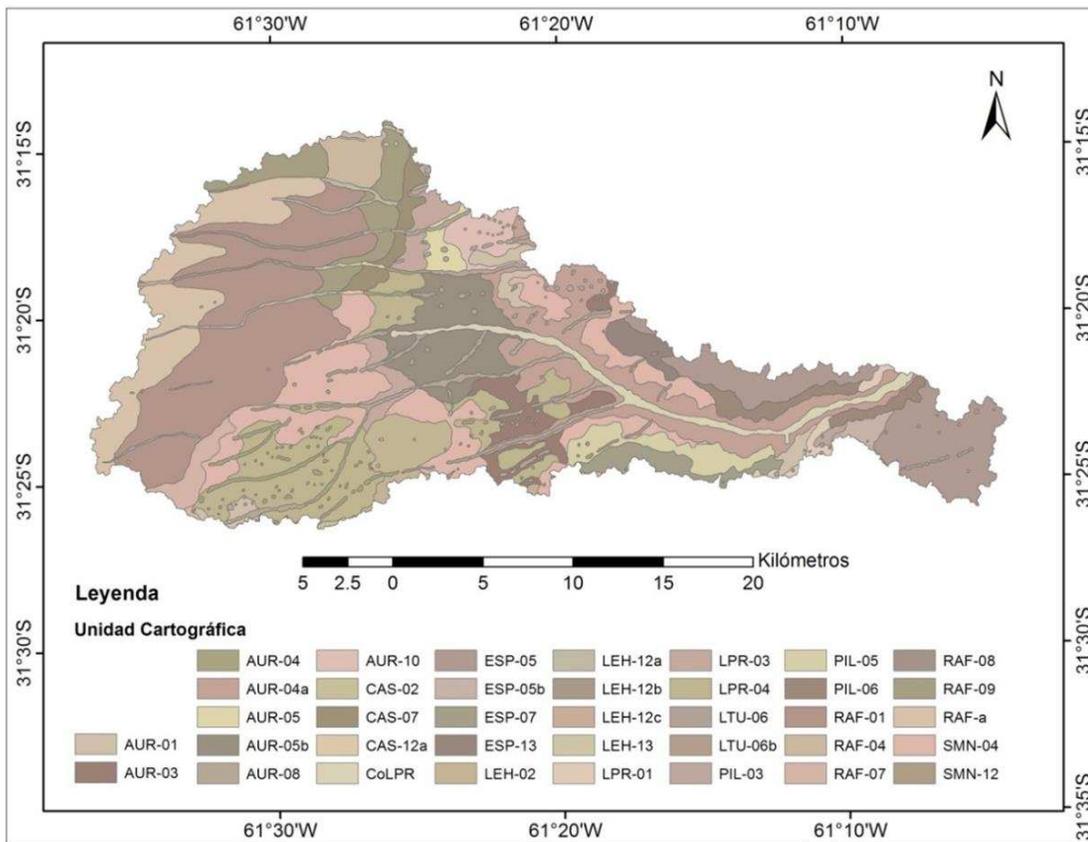


Figura 3. 10. Mapa de suelos de la cuenca Arroyo las Prusianas.

3.5 Modelo digital de elevación

El relieve de la región fue caracterizado utilizando diferentes fuentes de información, entre las cuales se destacan modelos digitales de elevaciones (MDE): ALOS PALSAR, SRTM y un producto del IGN generado por procesos de restitución fotogramétrica digital.

Con el fin de predecir correctamente el movimiento de la escorrentía superficial en la cuenca Arroyo las Prusianas, la topografía existente se complementó con datos topo altimétricos relevados en campo por la Provincia de Santa Fe con GPS diferencial que se utilizaron como puntos de control en tierra.

3.6 Imágenes de sensores remotos

El área de estudio cuenta con la cobertura del satélite Landsat 8. Este satélite de observación terrestre es el más reciente del proyecto “*Landsat*” operado por la NASA y el USGS de los Estados Unidos. Fue lanzado el 11 de febrero del 2013 y tiene suministros hasta el año 2023. Posee 2 sensores, uno operacional de imágenes en tierra (OLI) y otro infrarrojo térmico (TIRS). El OLI cuenta con 9 bandas espectrales que van desde el rango visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de ondas bajas. El TIRS está compuesto por 2 bandas espectrales que detectan infrarrojos térmicos y permiten determinar la temperatura de las diferentes superficies en tierra.

El satélite Landsat 8 gira en torno a la tierra cada 99 minutos, tiene una altura de vuelo de 705 [km] en órbita síncrona al sol, un ancho de pasada de 185 [km], una distancia de muestreo de 15 a 30 [km] y un tiempo de revisita de 16 días. Las bandas del sensor OLI tienen una resolución espacial de 30 [m]. Sin embargo, el sensor posee una mejora que hace que la banda pancromática posea resolución de 15 [m].

Las bandas TIRS se encuentran a resolución de 60 [m] pero son remuestradas a 30 [m] en la información del producto final.

La información generada por dicho satélite es de uso público, de carácter estándar y se encuentra disponible en los servidores globales de libre acceso como por ejemplo: USGS (<http://glovis.usgs.gov/> o <https://earthexplorer.usgs.gov/>), INPE (<http://www.dgi.inpe.br>), y LAADS (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>), entre otros.

Capítulo 4

Metodología y materiales

En esta sección se especifica la metodología desarrollada (Figura 4.1) con los materiales utilizados con el fin de aportar al conocimiento del funcionamiento hidrológico en la cuenca Arroyo las Prusianas.

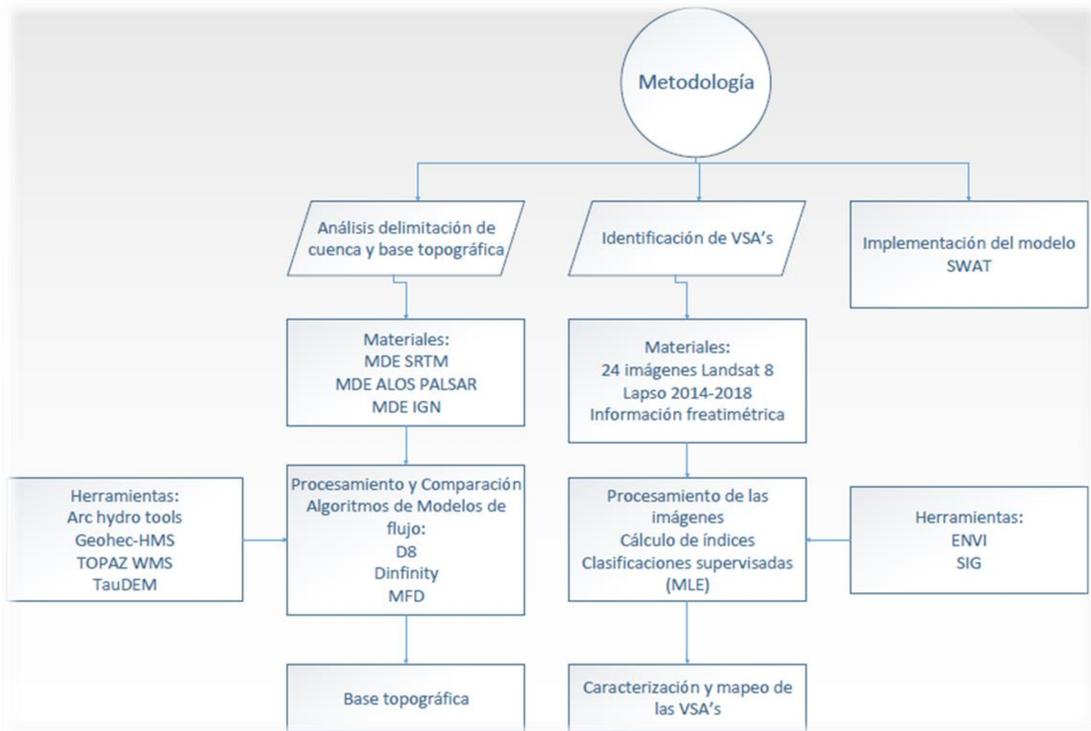


Figura 4. 1. Metodología.

Respecto al modelo digital de elevación se comparó, analizó y acondicionó el MDE para representar correctamente el movimiento del agua en superficie y así obtener la mejor base topográfica a partir de la información disponible. En este capítulo se describen los MDE's utilizados, se explican los modelos de flujo y los métodos usados.

La variabilidad temporal y espacial de las VSA's hace que sea muy difícil su identificación y caracterización (Van de Griend y Engman, 1985).

A este respecto, la tecnología satelital provee una cobertura espacial y temporal de datos que son adecuados para el análisis regional de este proceso generador de escorrentía. En este capítulo se realizó un análisis para identificar las VSA's en áreas de llanura a partir de clasificaciones supervisadas de imágenes de sensores remotos de media resolución espacial. Se comparó con los resultados obtenidos por Scioli, et al. (2013) y se caracterizó el bi-plot de la respuesta entre la interacción de las bandas SWIR vs. NDWI con el fin de discriminar áreas con diferente contenido de agua en el suelo.

Luego, son presentados los fundamentos teóricos del modelo hidrológico semi – distribuido, SWAT. Usado en la cuantificación de los patrones espacio temporales del balance hídrico en la cuenca Arroyo las Prusianas, seguido de una descripción de los datos de entrada implementados.

La implementación del modelo hidrológico requirió el ingreso de la siguiente información: modelo de elevación digital (MDE), series de variables climáticas continuas con alta resolución temporal, mapa de tipos del suelo con sus funciones de pedotransferencia y también la caracterización del uso del suelo en la zona en estudio. Toda esta información se integró como datos de entrada en el modelo numérico.

El mapa de usos del suelo en la cuenca es uno de los insumos vitales para el cómputo de las unidades de respuesta hidrológica (HRU). Se emplearon 2 mapas de usos del suelo en la modelación hidrológica semi-distribuida. El primero se obtuvo para un periodo relativamente normal (profundidad del NF > 2 [m]) a partir de modificar y adaptar en base a imágenes satelitales y una clasificación supervisada; los límites de las unidades contenidas en el mapa de usos de la tierra relevado con datos de campo por el INTA (actualizado por la provincia de Santa Fe) en el marco del

proyecto “*Sistema de Evaluación de Tierras de la Provincia de Santa Fe*”(ver Anexo 4). El segundo mapa utilizado fue generado a partir del uso de imágenes satelitales Landsat 8 de media resolución espacial y un producto base correspondiente a una clasificación supervisada con el método MLE para un periodo relativamente húmedo.

La definición del HRU se definió a partir de los resultados obtenidos al aplicar diversas configuraciones de umbrales en el modelo numérico. Lo anterior con el fin de representar las VSA’s conservando las características hidrológicas y del paisaje.

Finalmente se presentan los métodos y algoritmos utilizados para evaluar la incertidumbre del modelo numérico en la cuenca Arroyo las Prusianas con alta presencia de VSA’s.

4.1 Base topográfica

Para determinar **la base topográfica que mejor represente el relieve en esta zona de llanura** se realizaron comparaciones entre 3 Modelos Digitales de Elevaciones presentados a continuación (Tabla 4.1). Igualmente se analizaron los algoritmos comúnmente usados para determinar la red de drenaje en base al resultado de las funciones: dirección y acumulación del flujo.

Tabla 4. 1. Descripción de los MDE analizados.

MDE	Fuente	Resolución espacial [m]
Alos Palsar	Alaska Satellite Facility	12.5
SRTM	U.S Geological Survey	30
IGN	Instituto Geográfico Nacional	30

- a) Alos palsar, presentado en la Figura 4.2 (Advanced Land Observing Satellite), surge de una misión de la Agencia de Exploración Espacial de Japón (JAXA), está compuesto por un sensor sintético de apertura de banda L (Palsar) y cuenta con una resolución espacial de 12.5 [m]. Al descargar el producto ya posee corrección radiométrica del terreno (RTC) en base a datos observados por radar (SAR).

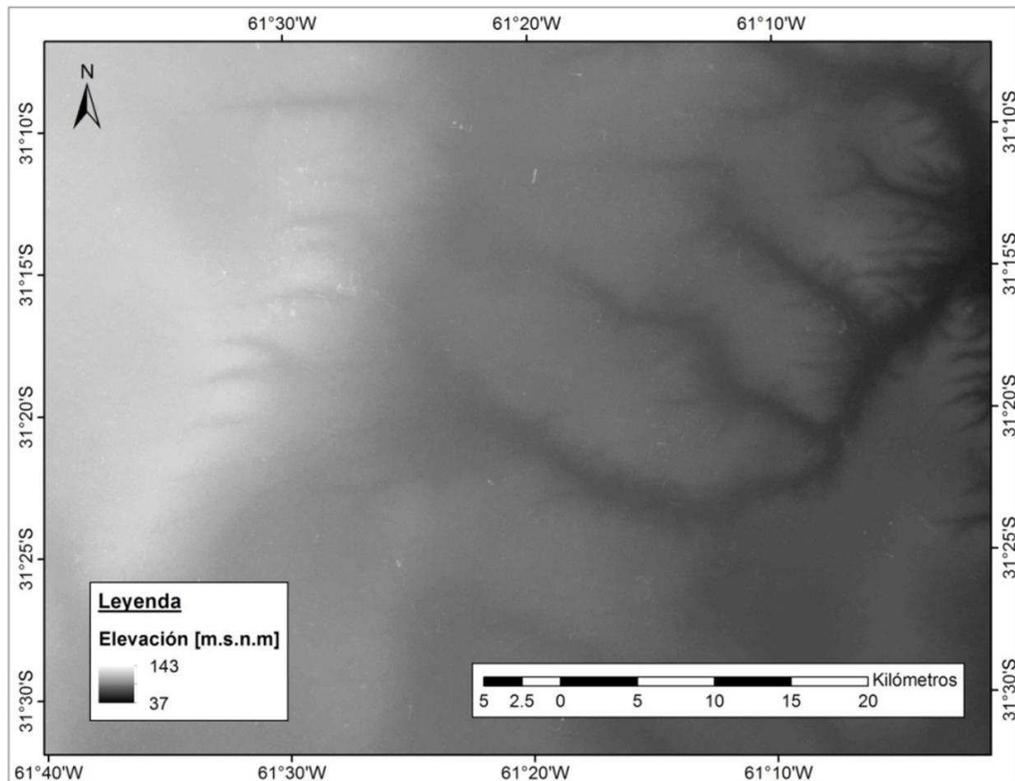


Figura 4. 2. MDE Alos pájaros.

- b) SRTM, presentado en la Figura 4.3 (Shuttle Radar Topography Mission). Surge de una misión lanzada en el año 2000 entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia Nacional de Cartografía e Imágenes del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (NIMA). Posee resolución espacial de 30 [m], tiene una precisión vertical de ± 16 [m] (Gesch et al, 2006), el terreno es corregido aplicando el concepto de superposición (interferometría) y para mejorar la resolución también utiliza SAR, lo anterior con el fin de corregir el desplazamiento en el geoide (Rodríguez et al, 2005).

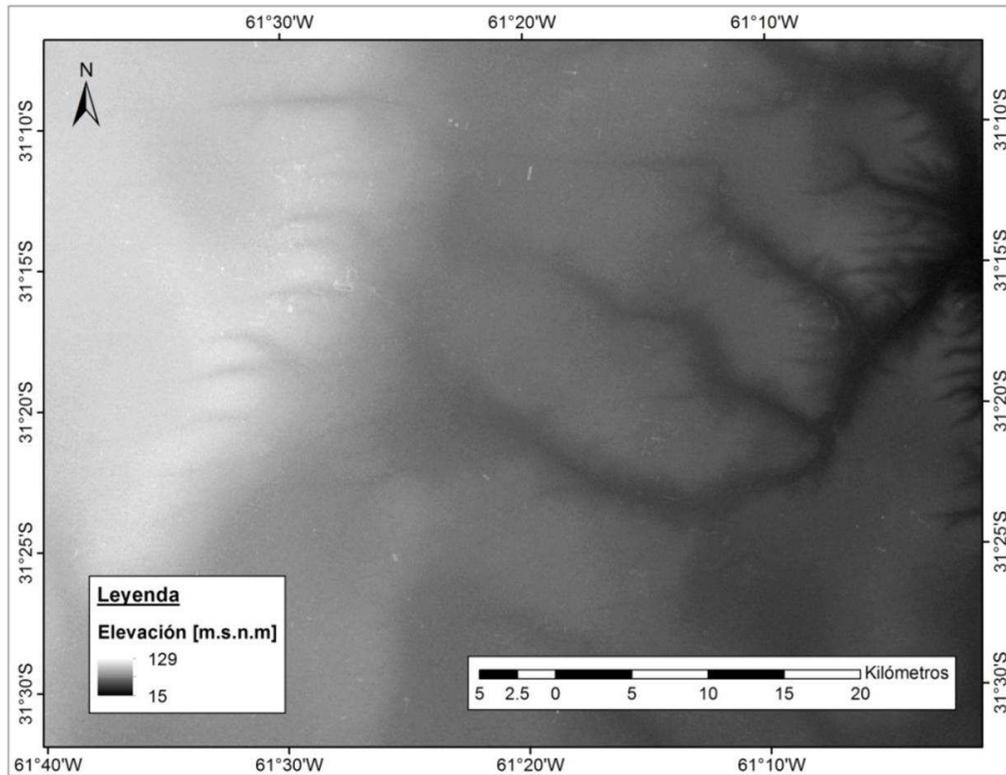


Figura 4. 3. MDE SRTM.

- c) MDE del Instituto Geográfico Nacional (IGN) presentado en la Figura 4.4, posee una resolución espacial de 30 [m] y precisión vertical submétrica, este producto es obtenido por procesos de restitución fotogramétrica digital ya que esta entidad ha capturado información espacial de elementos geográficos representativos de la superficie terrestre.

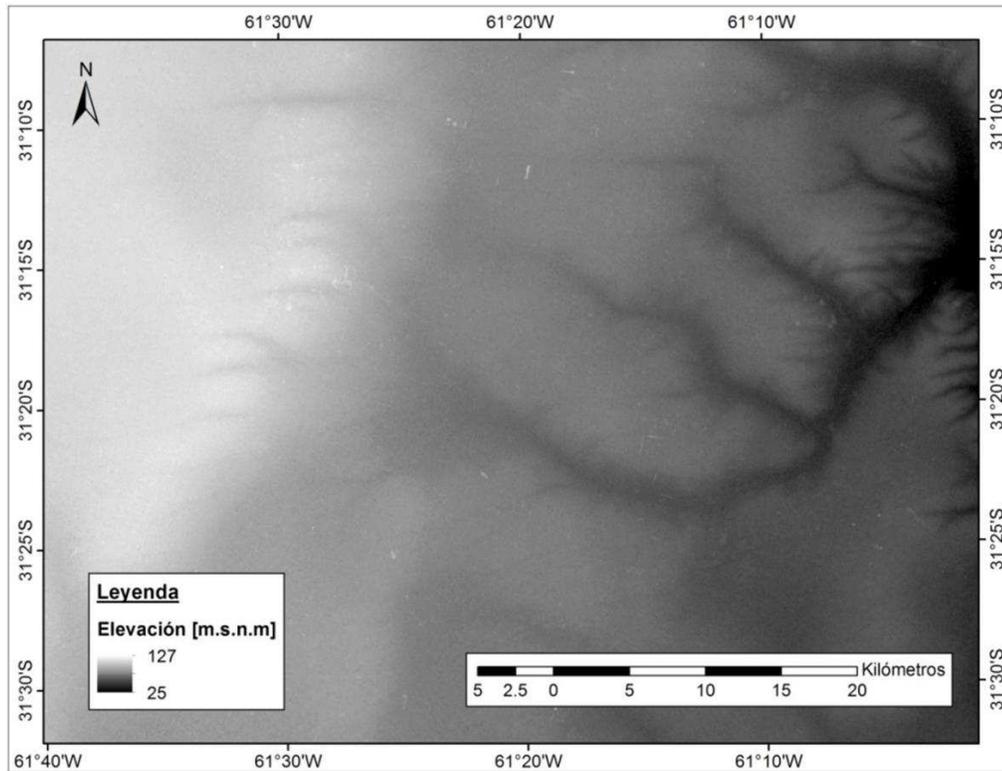


Figura 4. 4. MDE IGN.

El primer análisis básico, partió de la revisión de los estadísticos de cada MDE y la aplicación de un filtro de suavizado con el fin de eliminar errores de picos o sumideros (Tarboton, 1997). Este filtro mejoró la representación de las pendientes en la zona de transición donde existe un fuerte control estructural que hacia el este se integra en el valle fluvial hasta alcanzar el colector principal (Kröhling y Brunetto, 2013).

En la siguiente instancia, se analizó la dinámica hídrica en la cuenca mediante diversos modelos de flujo y se determinó la red de drenaje; vital en la delimitación de la cuenca (esto se realizó para cada MDE). La red de drenaje se determinó con las herramientas de dirección y acumulación de flujo dispuestas en los diferentes modelos de flujo comúnmente usados en la delimitación de cuencas hidrográficas: TauDEM (Tarboton, 2011), Arc – hydrotools, Geohec – hms y TOPAZ (WMS).

Se resalta que el cálculo del raster de dirección de flujo tiene mayor importancia porque si todos los píxeles del MDE tuvieran uno y solo un vecino inferior, el proceso de determinación de las direcciones de flujo sería muy simple y el requisito de utilizar otros algoritmos no existiría. Sin embargo, existen problemas al tratar depresiones y zonas planas como en este caso; que hacen que el proceso para determinar las direcciones de flujo sea bastante complejo. Por esta razón se acudió a la comparación de diversas herramientas con el fin de representar correctamente el sistema. El cálculo de la acumulación del flujo es sencillo una vez que se determinan las direcciones de flujo.

Mediante la utilización del Sistema de Información Geográfico arcGIS en coordenadas rectangulares bajo la referencia espacial WGS 84 correspondiente a la localización de la cuenca. Para cada MDE se delimitó la cuenca con el software WMS (Watershed Modeling System, <https://www.aquaveo.com/products>) que utiliza el modelo de flujo “TOPAZ” y la interfaz gráfica de arcGIS que cuenta con los modelos de flujo “MFD”, “D8” y “Dinfinity”(TauDEM) en los paquetes de herramientas (Arc – Hydrotools y HEC – GeoHMS). Estos algoritmos son descritos a continuación y en efecto, todos estos determinan la red de drenaje sujeta a los límites de cuenca resultantes en cada MDE.

- a) El método D8 (Figura 4.5) modela la dirección del flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada (posee 8 direcciones posibles), pero si una celda es más baja que sus vecinas, a esa celda se le asigna el valor de su vecina más baja y el flujo se define hacia esta celda. La salida de la herramienta Dirección de flujo ejecutada con el tipo de dirección del flujo D8 es un raster de números enteros cuyos

valores van de 1 a 128. Los valores de cada dirección desde el centro son los siguientes: Por ejemplo, si la dirección de la caída más empinada fuera hacia la derecha de la celda de procesamiento actual, la dirección de flujo estaría codificada con el número 1 como se observa a continuación.

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 4. 5. Algoritmo de dirección de flujo D8.

En el caso en que una celda posea el mismo cambio de altura en varias direcciones y no sea parte de un sumidero, la dirección de flujo se asigna con una tabla de búsqueda que define la dirección más probable (Greenlee, 1987). Pero en zonas de llanura, por lo general varias celdas vecinas poseen el mismo valor de elevación. En este caso, el algoritmo D8 a cada celda que cumpla esta condición le otorga un mismo valor generando posiblemente incongruencias en la red de drenaje. Por esta razón, es recomendable verificar este resultado con la traza en campo o mediante imágenes de sensores remotos de alta resolución.

- b) El algoritmo Dirección del flujo múltiple (MFD), descrito por Qin, et al. (2007) y presentado en la Figura 4.6, divide el flujo de una celda entre todos los vecinos con pendiente descendente. Se crea un exponente de partición de flujo a partir de un enfoque adaptable basado en las condiciones del terreno local y se usa para determinar la fracción de drenaje de flujo para todos los vecinos con pendiente descendente.

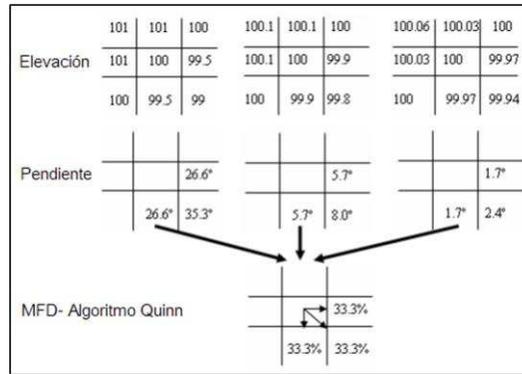


Figura 4. 6. Algoritmo MFD.

- c) El método de flujo D-Infinity (DINF), descrito por Tarboton (1997) y presentado en la Figura 4.7, determina la dirección del flujo como la pendiente descendente más empinada en ocho facetas triangulares formadas en una ventana de 4x4 celdas centrada en la celda de interés. La salida de dirección del flujo es un ráster de punto flotante representado como un solo ángulo en grados que van en sentido antihorario, de 0 (rumbo este) a 360 (rumbo este de nuevo).

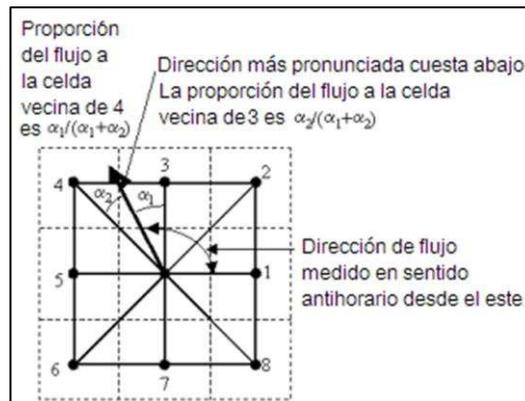


Figura 4. 7. Algoritmo de dirección de flujo DINF.

La ventaja de utilizar estos algoritmos (D8, MFD y Dinfinito) es que aumenta la exactitud en el cálculo del raster de dirección de flujo. Por otro lado, el WMS cuenta con el programa TOPAZ (Martz y Garbrecht, 1992), modificado específicamente para trabajar con este modelo hidrológico.

- d) El TOPAZ (Martz y Garbrecht, 1992) crea como salida la dirección y acumulación del flujo (Figura 4.8) por medio de considerar algoritmos programados de manera similar al D8 y Dinfinity pero con un umbral de influencia extra definido por el usuario en [km²].

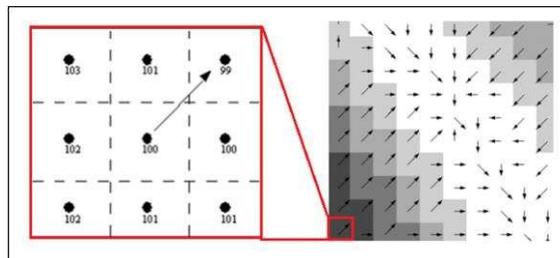


Figura 4. 8. Algoritmo TOPAZ.

En base al raster de dirección de flujo seleccionado se determinó la acumulación del flujo como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente como se observa en la Figura 4.9.

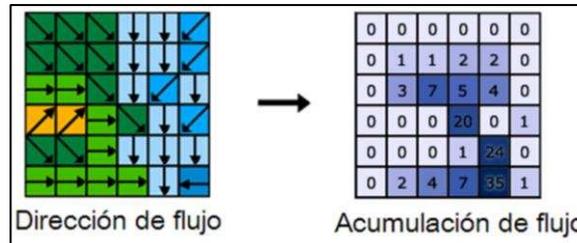


Figura 4. 9. Funcionamiento de los algoritmos de dirección y acumulación de flujo.

A partir de los resultados obtenidos en la comparación de los MDE y los raster de dirección y acumulación del flujo; se realizó la corrección de la dinámica hídrica ajustando la traza de la red de drenaje con la actual. Esta digitalización se llevó a cabo conservando la resolución espacial a detalle por medio de información relevada por el IGN que fue complementada con imágenes satelitales de alta resolución y puntos de control en tierra relevados por la Provincia de Santa Fe; todo con el fin de obtener la correcta delimitación de la cuenca Arroyo las Prusianas en base a la mejor base topográfica disponible.

4.2 Áreas Fuentes Variables

La metodología propuesta para el análisis de la **presencia de VSA's** en la región por medio de herramientas de teledetección se presenta en la Figura 4.10.



Figura 4. 10. Metodología a partir de teledetección.

La metodología partió de la selección y adquisición de 2 imágenes satelitales Landsat 8 correspondientes a dos años distintos con estados de saturación de la cuenca diferentes (año húmedo 2016 y en año seco 2014), calculados mediante el índice normalizado de precipitación “SPI”. El SPI es un potente y flexible índice basado en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal. Teniendo en cuenta la precipitación observada, la probabilidad de precipitación se transforma en este índice, que actualmente se utiliza en las investigaciones o en modo operativo en más de 70 países (McKee et al., 1993, 1995). El SPI sirve para analizar los períodos y ciclos húmedos como los secos (ver Anexo 1).

Las imágenes descritas en la Tabla 4.2 poseen correcciones geométricas por el desplazamiento del terreno debido al relieve como también sistemáticas aplicadas; utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) sobre la proyección cartográfica (WGS84). Fueron captadas el 15/11/2014 y el 26/04/2016 y se presentan en las Figuras 4.11 y 4.12 respectivamente. Además, la selección de estas imágenes estuvo condicionada a un criterio de calidad del producto con 0 % de contaminación por nubes.

Tabla 4. 2. Descripción de las imágenes satelitales analizadas.

Fecha	Sensor	Resolución espacial [m]	Resolución espectral [μm]	Año
15/11/2014	OLI	30	Azul: 0.452 - 0.512 Rojo: 0.636 - 0.673 Infrarrojo cercano: 0.851 - 0.879	Seco (Magnitud máxima SPI= -1.21)
26/04/2016			Infrarrojo de onda corta 2: 2.107 - 2.294	Húmedo (Magnitud máxima SPI= 1.32)



Figura 4. 11. Imagen Landsat 8, Noviembre 15 del 2014.

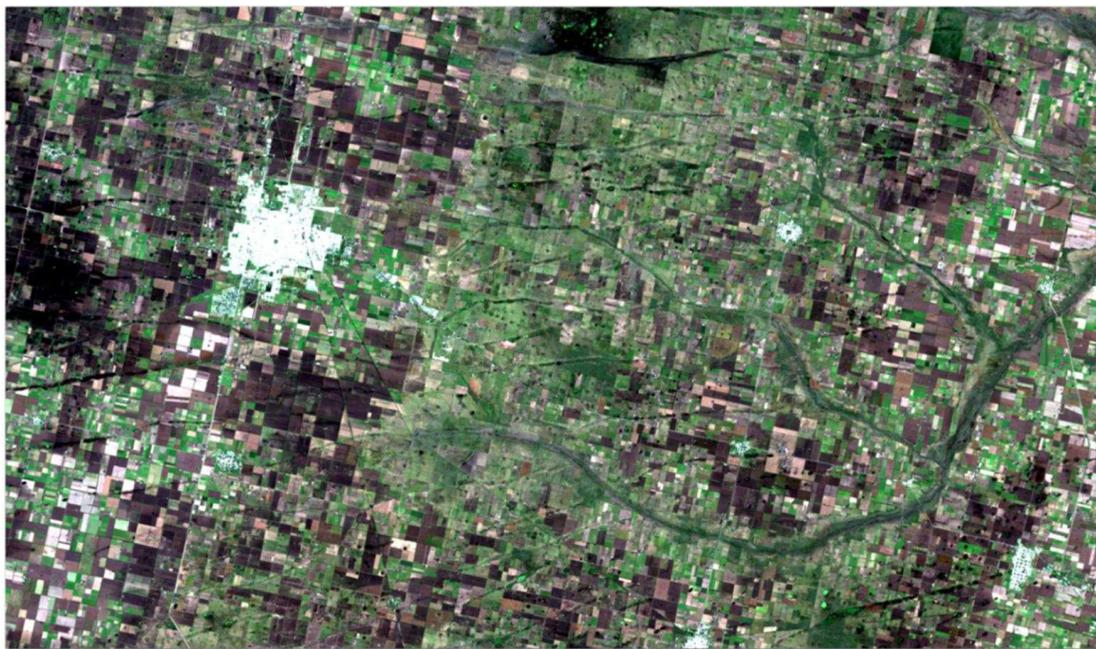


Figura 4. 12. Imagen Landsat 8, Abril 26 del 2016.

Los datos contenidos en estas imágenes fueron captados por el sensor OLI del satélite Landsat 8; son series cuantificadas, escaladas y calibradas en números digitales (ND), derivados en resolución radiométrica de 16 [bits]. Por lo anterior, fue necesario corregir las dos imágenes angularmente, radiométricamente (convirtiendo

los valores de ND a valores de reflectancia en el techo de atmósfera, bandas 1 a 9) y atmosféricamente, para evitar errores por ruido generados a partir de nubes, vapor de agua, entre otras distorsiones.

Para ello, se aplicó un pre – procesamiento en ENVI (ITT Visual Information Solutions, USA) con las diversas correcciones citadas: radiométrica, angular, atmosférica y topográfica o geométrica. Este pre – procesamiento se llevó a cabo siguiendo el documento “*Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*” publicado por el Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas del Instituto Agustín Codazzi de Colombia (CIAF, 2013).

La corrección radiométrica (TOA) se realizó por dos vías, la primera fue de forma manual, calculando los valores a reflectancia mediante la calculadora de bandas en ENVI con la Ecuación 4.1. Para este cálculo se extrajeron los coeficientes contenidos en el metadato utilizados para reescalar la información de cada banda con el fin de que la resolución radiométrica sea la correcta y así evitar pérdida de información en las bandas. La segunda manera en que se ejecutó la corrección radiométrica fue de forma automática por medio de la función de calibración radiométrica contenida en ENVI.

$$p\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (4.1)$$

$p\lambda'$: Valor de reflectancia sin corrección por ángulo solar.

M_p : Factor multiplicativo de escalado específico por banda (metadato)

Q_{cal} : Producto estándar cuantificado para valores de pixel (ND) de cada banda

A_p : factor aditivo de escalado específico por banda (metadato)

Póstumo, se realizó la corrección angular tanto manualmente con la ecuación 4.2, como también automáticamente por medio de la función de ENVI. Lo anterior esta atribuido a que la posición del sol con la tierra está en función del tiempo.

$$p\lambda = \left(\frac{p\lambda'}{\sin\theta_{SE}} \right) \quad (4.2)$$

$p\lambda$: Valor de reflectancia con corrección por ángulo solar.

θ_{SE} : Ángulo de elevación solar (metadato)

La corrección atmosférica se realizó con la finalidad de eliminar el componente intrusivo ocasionado por la atmósfera, efecto de los aerosoles y radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y que se refleja en las imágenes, producto de la interacción entre sensor y la atmósfera. Esta corrección permitió tener los valores a nivel de superficie (Bottom Of Atmosphere). Esta corrección se determinó mediante un método muy utilizado e incorporado en ENVI con título “*extracción por objeto oscuro*” (Bernstein et al, 2012).

Luego, para cada imagen se calcularon 2 índices espectrales: NDVI y NDWI. El índice de vegetación diferencial normalizado “NDVI” es ampliamente utilizado para monitorear coberturas vegetales debido a que es representativo del vigor de la vegetación. Por medio de la Ecuación 4.3 se determinó el NDVI con la respuesta entre las bandas infrarrojo cercano y rojo.

$$NDVI = \left(\frac{L_{NIR} - L_{ROJO}}{L_{NIR} + L_{ROJO}} \right) \quad (4.3)$$

L_{NIR} : Valores corregidos de la banda NIR.

L_{ROJO} : Valores corregidos de la banda ROJO.

Por otro lado, el índice diferencial de agua normalizado NDWI (Gao, 1996) indica la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Se calculó con la Ecuación 4.4 mediante la interacción entre las bandas infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta.

$$NDWI = \left(\frac{L_{NIR} - L_{SWIR}}{L_{NIR} + L_{SWIR}} \right) \quad (4.4)$$

L_{NIR} : Valores corregidos de la banda NIR.

L_{SWIR1} : Valores corregidos de la banda SWIR.

Posteriormente, a partir de píxeles test basados en fotointerpretación y píxeles de entrenamiento, se ejecutó un análisis de separabilidad para cotejar la exactitud y precisión de los mismos. Estos píxeles surgieron de la sobreposición de los índices espectrales como también de fotointerpretación según la respuesta espectral de diferentes configuraciones falso color como por ejemplo R: SWIR2, G: SWIR1, B: ROJO: usada para determinar píxeles urbanos (Figura 4.13).



Figura 4. 13. (a) Falso color urbano imagen 15/11/2014. (b) Falso color urbano imagen 26/04/2016.

En total se crearon 6 clases de coberturas superficiales con el fin de identificar las VSA's. Estas clases surgieron de la respuesta conjunta de las bandas (reflectancias) como también de los valores de los índices espectrales y sus estadísticos para cada fecha de imagen. A modo de regiones de interés fueron discriminadas las clases con un respectivo color característico: urbano (naranja), suelo seco (rojo), vegetación (verde), suelo húmedo (bordó), vegetación con agua (cian) y agua (azul). Las clasificaciones supervisadas se realizaron mediante el método de máxima verosimilitud (MLE) que es generalmente usado por su alta bondad de ajuste (Gomaríz et al, 2013).

Este método ofrece valores consistentes al obtener la información con sensores remotos (Swain y Davis , 1978). El MLE maximiza la función de verosimilitud para determinar los parámetros que tienen mayor probabilidad de reproducir los datos observados. Su uso está condicionado al tamaño de muestra y a que los datos no estén distribuidos normalmente debido a que su modelado es fuertemente no lineal como en este caso.

Conforme a lo anterior, póstumo a la obtención de los resultados de las clasificaciones supervisadas se ejecutó una evaluación de exactitud por medio de la generación de matrices de confusión con el fin de obtener índices de eficiencia (coeficientes kappa).

Una de las aplicaciones de estos productos resultantes es determinar los límites entre un píxel con humedad y uno seco dentro del bi-plot NDWI Vs. SWIR2. Para ello, se redujeron a 2 la cantidad de clases inmersas en las clasificaciones supervisadas a partir de unificar las 6 categorías planteadas previamente en dos grupos de acuerdo al contenido de humedad. La primera nueva clase surge de la combinación de las 3 clases (agua, vegetación con agua y suelo húmedo) y la segunda se conformará con las 3 clases restantes (urbano, suelo seco, vegetación).

De seguido, cada imagen fue caracterizada a partir de hacer un bi-plot en ENVI del índice normalizado de contenido de humedad (eje Y: NDWI) contra la respuesta de la reflectancia en la banda infrarrojo de onda corta (eje X: SWIR2); como aplicación de la técnica adecuada para identificar las VSA's en zonas de llanura propuesta por Scioli, et al. (2013). Este autor identifica zonas con alto contenido de humedad a partir del uso de técnicas de teledetección usando diferentes bandas de las imágenes satelitales.

Para ello, interpreta el gráfico 2D (bi-plot) que se genera al plotear en ejes cartesianos (X, Y) los valores de las bandas SWIR2 y NDWI.

De manera que al seleccionar grupos de píxeles en el bi-plot con determinadas características de cobertura, composición mineralógica y humedad es posible visualizar la ubicación espacial de los mismos en las imágenes. La banda del infrarrojo de onda corta representa la variación del contenido de agua en la mayoría de coberturas superficiales (esto se verificó con las firmas espectrales de cada una de las clases distinguidas). En la longitud de onda del infrarrojo de onda corta el contenido de humedad produce una disminución de la reflectividad. Se resalta que una de las ventajas de su utilización es que el efecto de los aerosoles para estudiar cuerpos de agua en esta longitud de onda es insignificante (Kaufman et al., 1997). Por otro lado, el NDWI permite discriminar el contenido de humedad foliar de la vegetación y en general el estado de la vegetación y la saturación de una cuenca hidrográfica.

La metodología planteada por Scioli, et al. (2013) se aplicó entonces para dos estados de saturación de cuenca con el objetivo de: verificar, comparar y caracterizar el bi-plot NDWI Vs. SWIR2. Los resultados de las caracterizaciones fueron contrastados con los rangos de variación en la banda SWIR2 de diferentes coberturas propuestos por Kaufman, et al. (1997).

Finalmente, se propone una caracterización del bi-plot NDWI Vs. SWIR2 validada en 24 imágenes satelitales Landsat 8. Lo anterior aporta al entendimiento del comportamiento de la distribución de los píxeles que corresponden a VSA's.

4.3 Modelo SWAT

El modelo SWAT es una herramienta que permite simular los procesos físicos del ciclo hidrológico a escala subdiaria, diaria, mensual o anual. Su aplicación requiere de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento) e información distribuida espacialmente de: elevación del terreno, usos y tipos del suelo.

SWAT divide la cuenca hidrográfica en múltiples subcuencas que a su vez están caracterizadas con diferentes unidades de respuesta hidrológica (HRU's). Cada HRU está configurado a partir de la única combinación entre la información de: pendiente, uso y tipo de suelo. Utilizar HRU's es una estrategia de los desarrolladores del modelo SWAT para representar y simular los procesos en el modelado de la cuenca con mayor precisión. En cada HRU se computa el balance hídrico mediante 5 reservorios lineales (Anexo 2). En base a lo anterior, el modelo SWAT ejecuta la simulación en dos fases. La primera corresponde a la “fase terrestre del ciclo hidrológico” que está sujeta a la resolución de la Ecuación 4.5 y simboliza los procesos de escorrentía que ocurren superficialmente y sub-superficialmente, al igual que la circulación de sedimentos, nutrientes y pesticidas a través de los flujos de agua en todas las subcuencas (Neitsch et al., 2011). La segunda fase corresponde a la “fase de enrutamiento” en donde se caracteriza el movimiento de agua y sedimentos a través de la red de drenaje hasta el cierre de cuenca.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}). \quad (4.5)$$

Donde: SW_t [mm]: contenido de agua almacenada en el suelo al día t , SW_0 : contenido inicial de agua en el día i [mm]; t : tiempo en días, R_{day} : precipitación diaria [mm], Q_{surf} : cantidad de escorrentía diaria [mm], E_a : evapotranspiración diaria [mm], W_{seep} : percolación diaria [mm] y Q_{gw} : flujo base dado por el componente subterráneo [mm].

SWAT posee bases de datos que están alimentadas por la información previamente citada exclusivamente para los Estados Unidos. Sin embargo, el modelo permite al usuario ingresar nueva información de acuerdo a los requerimientos del modelador. Por ende, en esta tesis se optó por generar una base de datos propia con el fin de incluir la información característica del área de estudio. Las fuentes de las cuales se obtuvo la información y la metodología para la preparación de esta base de datos se resumen a continuación.

La información meteorológica fue proporcionada por el INTA en la estación Rafaela R87359, para el periodo 01/01/2005 hasta el 12/31/2018 a escala diaria. La información obtenida corresponde a las siguientes variables: precipitación, lluvia máxima en 30 minutos, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento 2 [m] y niveles freáticos. Los caudales en el cierre de cuenca se obtuvieron por parte del actual Ministerio del Agua y Servicios Públicos.

Las elevaciones del terreno surgieron del ingreso de la mejor base topográfica presentada en el capítulo V. La delimitación de la cuenca se realizó con la interfaz del SWAT; evaluando la correspondencia del resultado versus la cuenca obtenida en el capítulo V. El mapa de pendientes se reclasificó en clases de acuerdo a los valores naturales donde el histograma presentaba puntos de inflexión.

Para los usos y/o coberturas del suelo se ingresaron al modelo 2 productos. El primer mapa, como ya se había mencionado fue adaptado y modificado para un periodo relativamente normal (profundidad del NF > 2 [m]) teniendo en cuenta imágenes satelitales Landsat 8, una clasificación supervisada mediante MLE y el producto SET-SF que incluye el Agrupamiento por Aptitud Agropecuaria de las Tierras: GAT e Índices de Aptitud Agropecuaria de las Tierras: IAT.

El SET-SF es un sistema modificable y en evolución continua (Giorgi et al, 2010); fue diseñado para indicar los usos y/o coberturas de la tierra e identificar los principales problemas que condicionan el manejo de los mismos. La principal ventaja del SET-SF (Giorgi et al, 2010) es que esta información fue relevada en campo por el INTA a escala semidetallada y fue actualizado por la Provincia de Santa Fe.

El nuevo primer mapa del uso del suelo siguió las clases adoptadas en el capítulo VI (urbano, suelo seco, vegetación, suelo húmedo, vegetación con agua y agua). Para ello, fue necesario agrupar las tierras que presentaron restricciones similares en intensidad para la producción agrícola y/o la ganadería. Por lo que, en un sentido amplio, se consideró que la clase “*suelo húmedo*” puede ser destinada al mismo uso tal como fue asumido por Giorgi et al., (2010).

Las tierras agrícolas fueron dispuestas para cultivos comunes y climáticamente adaptadas. Se consideraron cultivos comunes la soja, el maíz, el sorgo, el girasol, el trigo y algunos forrajeros, especialmente la alfalfa (Giorgi et al, 2010). La clase “*suelo seco*” fue asumida como suelos desnudos. La “*vegetación*” fue considerada con pasturas mayormente ganaderas según su intensidad de uso. Los límites de la “*vegetación con agua*” fueron modificados de acuerdo a las restricciones identificadas en cada unidad. Las “*zonas urbanas*” fueron tomadas del SET-SF a pesar que los autores sobreestimaron los límites de las mismas. El colector principal del Arroyo las Prusianas (*agua*) fue adoptado del SET-SF.

Se enfatiza que en las clases “*suelo seco*”, “*suelo húmedo*” y “*vegetación*” existen restricciones cualitativamente distintas. Todas las tierras clasificadas en estas 3 clases no responden de igual manera bajo un único sistema de manejo.

El segundo mapa de usos del suelo fue generado en base a un periodo relativamente húmedo a partir de información proveniente de sensores remotos y una clasificación supervisada mediante una imagen satelital Landsat 8 con el método MLE. La utilización de estos dos mapas se realizó con el único objetivo de intentar mejorar la representación de las VSA's en la región con el modelo SWAT.

Los tipos de suelos que comprenden la cuenca se recopilaron tanto a nivel cartográfico como taxonómico del INTA Rafaela a escala 1:50.000.

Luego de generar y relacionar la base de datos propia en el SWAT, el modelo sobrepuso las capas de información correspondientes a los usos del suelo, tipos de suelos y pendientes. Todas las combinaciones posibles resultantes se tuvieron en cuenta en la definición de las unidades de respuesta hidrológica (HRU's).

Las HRU's son homogéneas basadas físicamente pero estas áreas no están contiguas sino que responden de manera similar y no tienen ninguna conectividad hidrológica, por lo tanto, el resultado del balance hídrico de cada HRU va directamente a la salida de la subcuenca o al sistema de acuíferos. Para el SWAT, una misma HRU puede emplazarse en varios lugares dentro de una subcuenca. Efectivamente ignorando la distribución espacial subyacente. Esta limitante también impide que el modelo pueda representar las VSA's en la cuenca Arroyo las Prusianas.

La definición de los HRU's comúnmente es llevada a cabo con la especificación de umbrales en porcentaje para cada una de las capas de información (usos del suelo, tipos de suelos y pendientes). En esta tesis se evaluó diferentes configuraciones de umbrales (Anexo 4) para intentar representar correctamente las VSA's. La aplicación de los HRU's pretende mejorar la eficiencia en los cálculos manteniendo las características del paisaje en pro del modelado hidrológico.

La lógica del modelo en el proceso de definición del HRU se presenta en el Anexo 4. Luego de la definición de los HRU's, se cargó la información meteorológica y posteriormente se completó las tablas de cálculo del modelo numérico para finalmente proceder a configurar los métodos que intervinieron en el balance hídrico para posterior calibración validación y explotación del modelo.

4.4 Incertidumbre en la modelación hidrológica

La calibración de un modelo radica en determinar un juego de parámetros con el fin de lograr representar los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico con tal de obtener un buen ajuste entre el caudal observado versus el simulado. Generalmente en esta etapa los parámetros de los modelos son forzados numéricamente para llegar a este dicho ajuste perdiendo algunas veces su significado físico.

El análisis de sensibilidad y la calibración de los parámetros que controlan el flujo superficial se realizó a través del programa código libre SWAT – CUP. Cuenta con cinco algoritmos para la calibración: Ajuste de Incertidumbre Secuencial (SUFI-2), Probabilidad de Incertidumbre Generalizada (GLUE), Solución de parámetros (ParaSol) y los métodos de inferencia Bayesiana (MCMC) (Abbaspour et al , 2004), (Abbaspour, 2007) (Yang et al, 2008) (Abbaspour et al, 2015).

Se utilizó el algoritmo SUFI-2 porque permite jerarquizar la secuencia de la calibración con el fin de representar los caudales observados y las condiciones físicas naturales existentes en la cuenca. Mediante la definición de los parámetros, los rangos de variación (teniendo en cuenta valores bibliográficos de la zona), se evaluó la sensibilidad del modelo a través de los coeficientes “*t – stat*” y “*p – value*” (Anexo 4); los cuales están íntimamente relacionados. El “*t – stat*” es el coeficiente de un

parámetro dividido por su error estándar. Es una medida de la precisión con la que se estima el coeficiente de regresión. Si un coeficiente es "elevado" en comparación con su error estándar, entonces probablemente sea diferente de 0; por lo que el parámetro sería sensible. A diferencia del "p – value", en el que para cada término se prueba la hipótesis nula (coeficiente igual a cero, sin efecto). Un valor bajo de "p – value" (<0.05) indica que se puede rechazar la hipótesis nula.

En otras palabras, un parámetro que tiene un valor bajo de "p – value" es probable que sea significativo para el modelo, porque los cambios en el valor del predictor están relacionados con los cambios en la variable de respuesta. Por el contrario, un valor elevado de "p – value" sugiere que los cambios en el predictor no están asociados con cambios en la respuesta. Entonces ese parámetro no es muy sensible (Guevara, 2019).

Para **evaluar la incertidumbre** del modelo SWAT se utilizaron los caudales observados y simulados en el cierre de cuenca. Se calculó y analizó el ajuste del mismo con los siguientes estadísticos: coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NS), coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo porcentual (pbias).

Capítulo 5

Topografía

5.1 Modelo digital de elevación acondicionado

La Tabla 5.1 y la Figura 5.1 muestran los resultados obtenidos del ejercicio de comparación de los MDE de acuerdo a la aplicación de diversos modelos de flujo. Cabe resaltar que mediante las herramientas HEC-GeoHMS y Arc Hydrotools, se obtuvieron resultados similares por cada MDE. La razón radica en que estos paquetes están programados en base a los mismos algoritmos de modelo de flujo. Por otro lado, el resultado del TOPAZ del WMS presentó diferencias morfométricas significativas entre MDE.

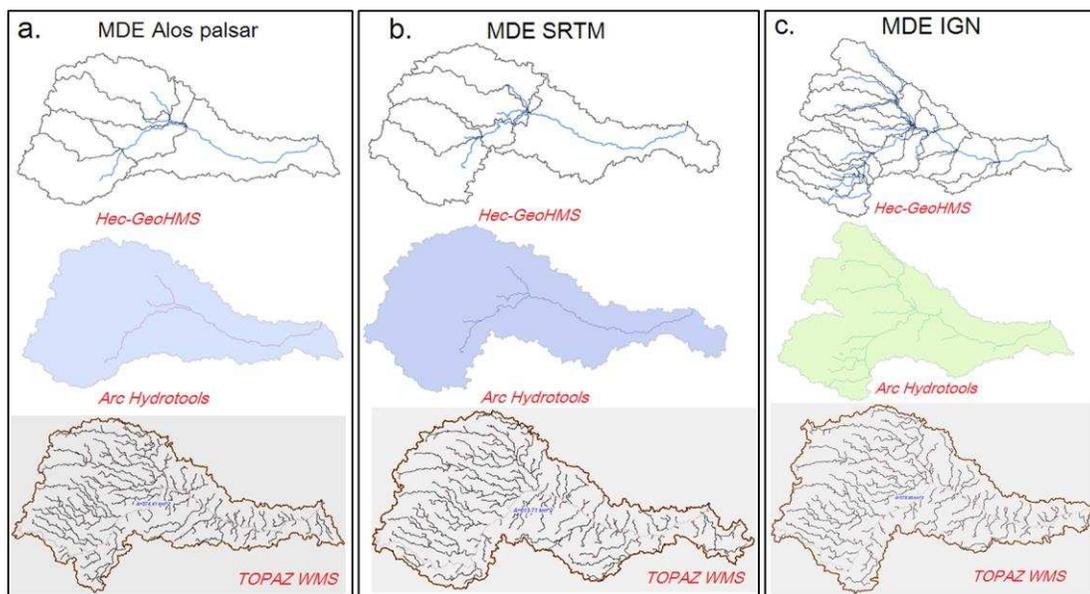


Figura 5. 1. Comparación cuencas generadas por diferentes MDE.

Tabla 5. 1. Comparación de MDE mediante diferentes modelos de flujo.

MDE	Modelo de flujo	Área [km ²]	Pendiente media [%]
ALOS PALSAR	HEC-GeoHMS	584.2	2.1
	Arc Hydrotools	584.2	2.1
	TOPAZ WMS	574.4	2

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN ACONDICIONADO

MDE	Modelo de flujo	Área [km²]	Pendiente media [%]
SRTM	HEC-GeoHMS	629.1	1.1
	Arc Hydrotools	629.1	1.1
	TOPAZ WMS	613.7	1
IGN	HEC-GeoHMS	644	1.48
	Arc Hydrotools	644	1.51
	TOPAZ WMS	578.9	1

Como se observa previamente, el MDE Alos Palsar presentó sobreestimación en las geoformas tales como: paleocauces, cañadas, hoyas de deflación, bloques elevados y lomas; a causa de la resolución espacial. Por lo cual, fueron modificadas las pendientes existentes en la cuenca (aunque la forma de la misma se conservó). En una investigación Blumenfeld (2015) también determinó que el MDE Alos Palsar prepondera las geoformas.

Por otro lado, el MDE SRTM mantuvo cuencas similares con pendientes medias características de la zona en estudio. Mientras que las cuencas generadas con el MDE IGN presentaron gran diferencia entre sí. Sin embargo, existen zonas al norte, sur y oeste de la cuenca que se presentan en la Figura 5.2 que debieron ser estudiadas con mayor detalle porque no fue clara la delineación de la cuenca Arroyo las Prusianas en esos sectores.

Teniendo en cuenta lo anterior, se optó por la selección del MDE SRTM con el modelo de flujo TOPAZ. Además, se analizaron las diferencias de los 3 productos de cuenca obtenidos mediante el uso del paquete de herramientas de edición del MDE del SIG hidrológico WMS.

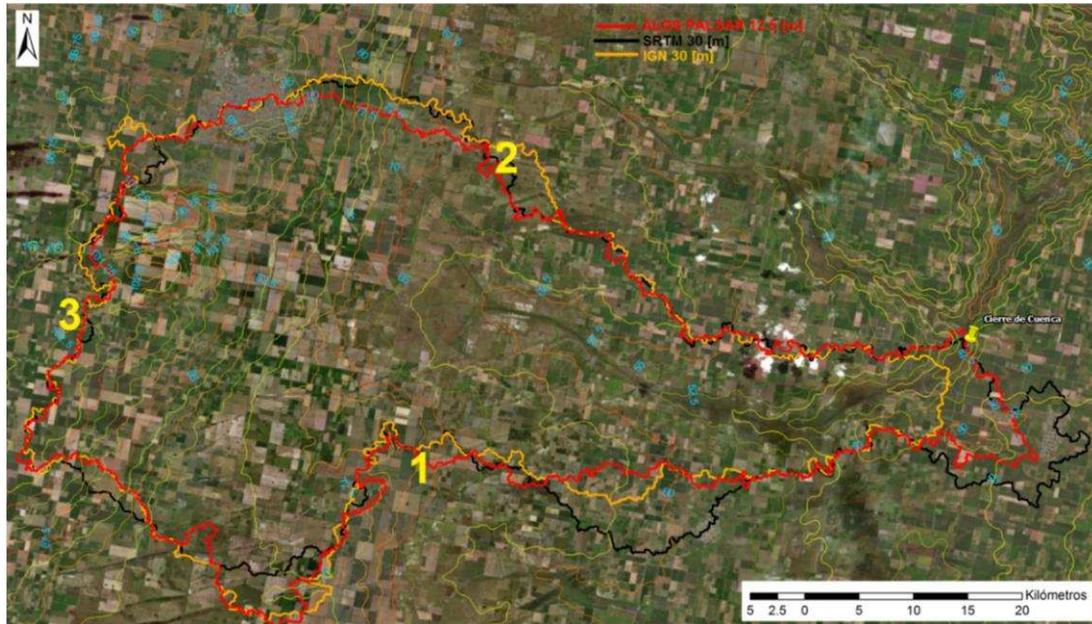


Figura 5. 2. Corrección sectorizada (1: Sur, 2: Norte, 3: Oeste) de la delimitación de la cuenca (Rojo: Alos Palsar, Negro: SRTM, Naranja: IGN).

Para corregir la delimitación de la cuenca en los límites difusos resaltados en la Figura 5.2 se analizó la dinámica hídrica contemplando una imagen satelital de alta resolución, curvas de nivel 2.5 [m] y la red de drenaje actual digitalizada (Figura 5.3). Igualmente, se corroboraron las alturas del MDE según datos topo altimétricos relevados en campo por la Provincia de Santa Fe. Lo anterior con el fin de disminuir el error en la estimación de la elevación y atenuar el error generado por el truncamiento de decimales.

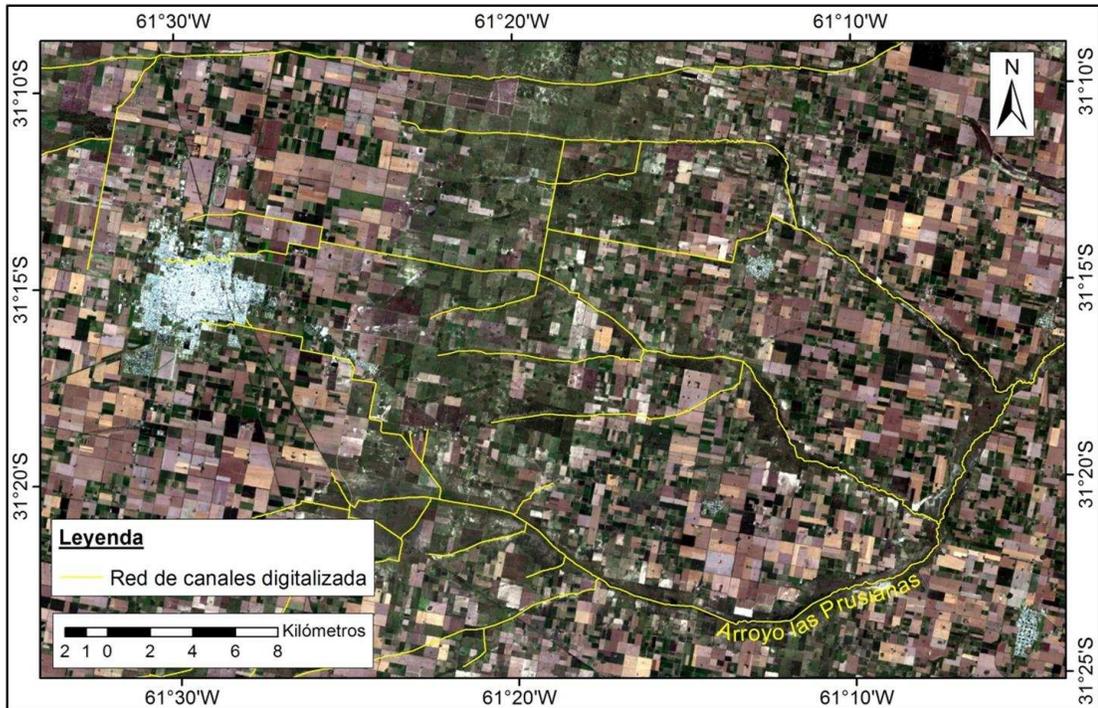


Figura 5. 3. Red de drenaje actual digitalizada de la cuenca Arroyo las Prusianas.

Los límites difusos en los sectores Sur, Norte y Oeste fueron delineados manualmente con el material citado previamente. Además, fueron trazados los perfiles transversales A-A' (amarillo), B-B' (verde), C-C' (violeta), D-D' (negro) y E-E' (cian). Como se observa en las Figuras 5.4 y 5.5.

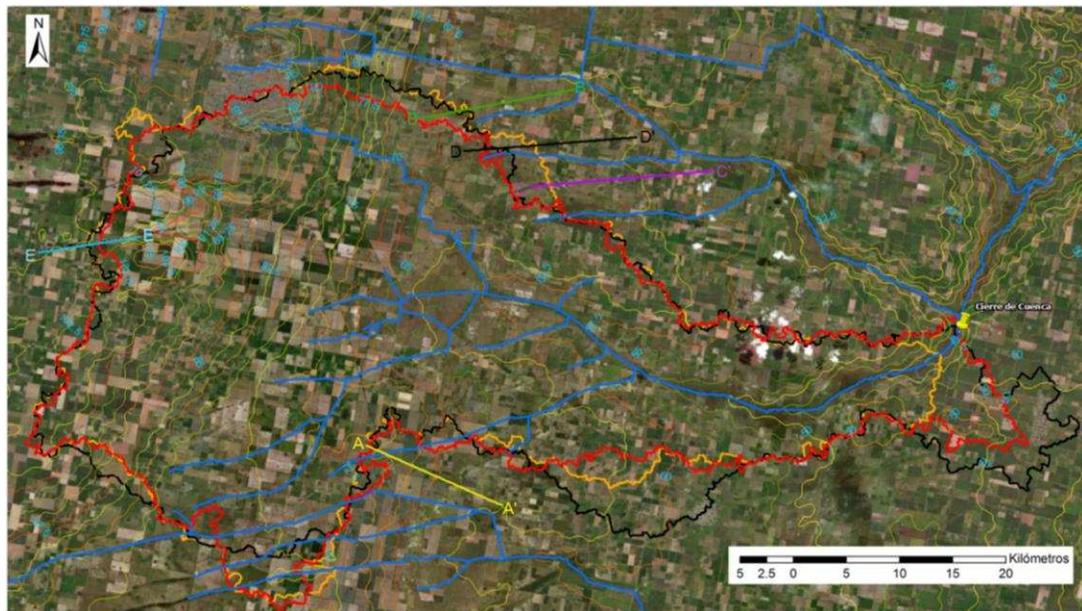


Figura 5. 4. Perfiles transversales en los límites difusos en la cuenca.



Figura 5. 5. Detalle de la dinámica hídrica en los sectores difusos Sur, Norte y Oeste.

El MDE seleccionado que mejor representó la cuenca Arroyo las Prusianas fue el SRTM 30 [m] ya que generó una red de drenaje más realista y cercana a la digitalizada manualmente. Al realizar la corrección hidrológica para acondicionar el MDE SRTM seleccionado, los límites de la cuenca se modificaron en los sectores críticos en cuanto a la modificación de la dinámica hídrica verificada con datos topo altimétricos relevados en campo.

Finalmente, se delimitaron correctamente los límites de la cuenca Arroyo las Prusianas (Figura 5.6) que paso de tener un área de 613.7 a 568.9 [km²]. Igualmente, se logró obtener la mejor base topográfica que fue usada en la modelación hidrológica semi – distribuida con el modelo SWAT.

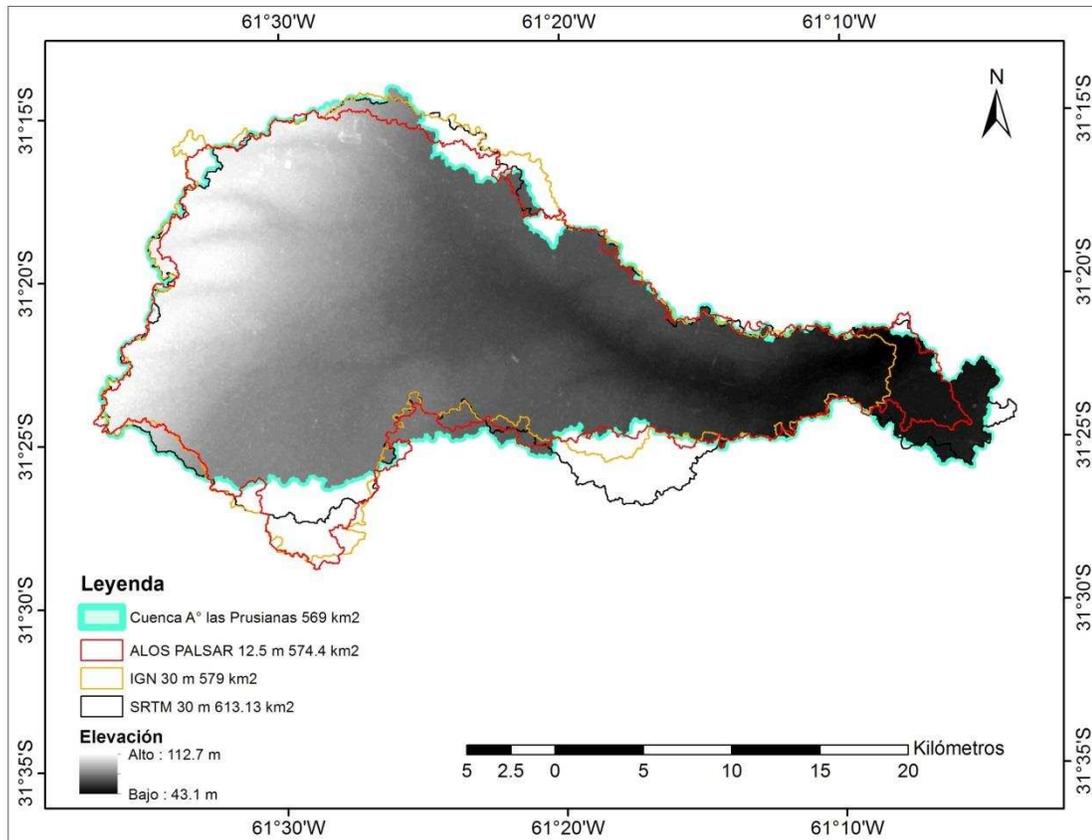


Figura 5. 6. Cuenca Arroyo las Prusianas producto del análisis de la mejor base topográfica.

Capítulo 6

Identificación de VSA's mediante imágenes de sensores remotos

6.1 Pre-procesamiento

Los resultados del pre-procesamiento de las dos imágenes en configuración color natural (RGB) se presentan en las Figuras 6.1. Como se puede observar, las imágenes se diferencian entre sí sobre todo en la planicie aluvial y en la franja fluvial actual del Arroyo las Prusianas debida al periodo hídrico que experimenta cada una.

En la época de sequía predomina un paisaje con suelos desnudos hacia el oeste y este, además la planicie aluvial en la zona céntrica (que se extiende hacia el norte de la imagen) está vegetada pese a la condición climática (Figura 6.1 a).

Mientras que para la otra imagen, la capacidad de infiltración de la cuenca no es suficiente para almacenar el agua; por lo que se evidencian zonas con contenido de humedad alto que se visualizan en tonos de color negro. Además, se distingue la activación de algunos paleocauces y cañadas en dirección oeste – este; que temporalmente se integran a la red de drenaje (Figura 6.1 b).



Figura 6. 1. a) Imagen Landsat 8, Noviembre 15 del 2014. b) Imagen Landsat 8, Abril 26 del 2016.

6.2 Índices espectrales

Los resultados del cálculo de los índices espectrales NDVI y NDWI se presentan en las Figuras 6.2 y 6.3 respectivamente.

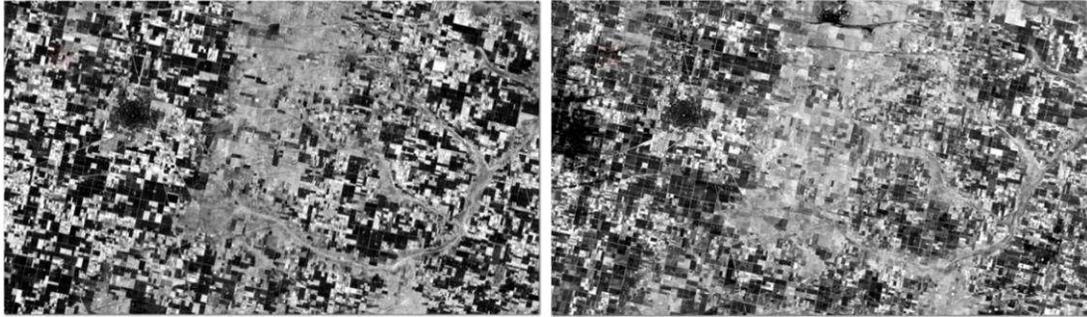


Figura 6. 2. (a) NDVI 15/11/2014. (b) NDVI 26/04/2016.

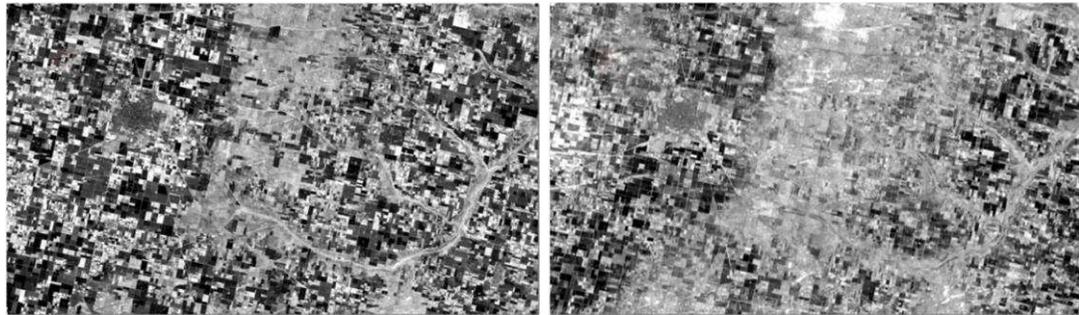


Figura 6. 3. (a) NDWI 15/11/2014. (b) NDWI 26/04/2016.

6.3 Clasificaciones supervisadas

Los resultados de las clasificaciones supervisadas se presentan en las Figuras 6.4 y 6.5. Los colores por cada clase son los siguientes: urbano (naranja), suelo seco (rojo), vegetación (verde), suelo húmedo (púrpura), vegetación con agua (cian) y agua (azul). La calidad de las clasificaciones se determinó mediante la generación de una matriz de confusión póstuma a cada clasificación supervisada. Las eficiencias y coeficientes Kappa obtenidos fueron de 95.9%, 0.94 y 91.7%, 0.88 correspondientes a las imágenes del 15/11/2014 y 26/04/2016 respectivamente.

Además se aplicó un filtro de mayoría con la menor varianza para suavizar el cambio de clases entre píxeles por la resolución del sensor.

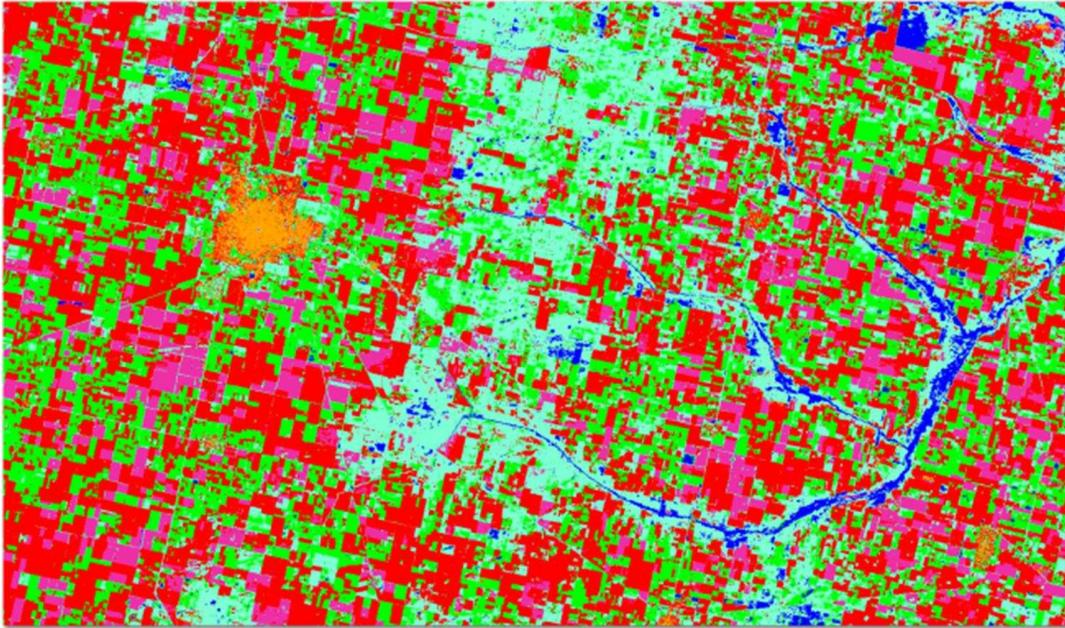


Figura 6. 4. (a) Clasificación supervisada imagen 15/11/2014.

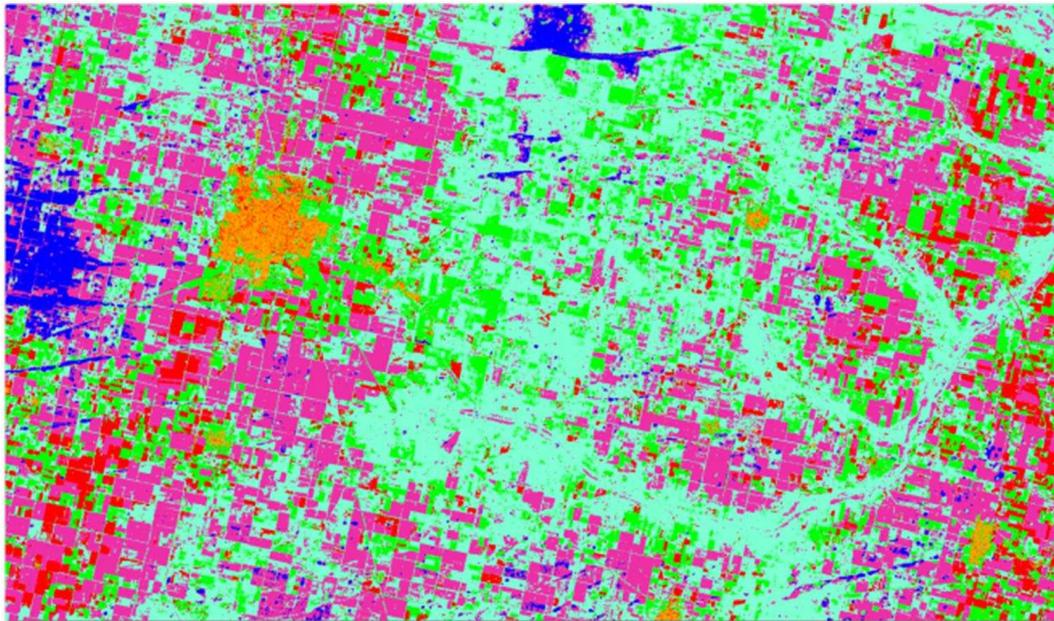


Figura 6. 5. Clasificación supervisada imagen 26/04/2016.

Por otro lado, estos resultados (Figuras 6.4 y 6.5) fueron utilizados para determinar el límite dentro del bi-plot SWIR2 Vs. NDWI entre un píxel con algún grado humedad de un píxel seco. Esto se realizó mediante la generación de otras 2

clasificaciones supervisadas (MLE), unificando las 3 clases con algún contenido de humedad (agua, vegetación con agua y suelo húmedo) de acuerdo a los píxeles test ya declarados inmersos en las 6 clases ya adoptadas. Esta nueva categoría fue titulada “contenido de humedad” y se representa en color azul. Las 3 clases restantes (urbano, suelo seco, vegetación) se agruparon en una categoría titulada “sin contenido de humedad” con color rojo. Los resultados obtenidos por imagen de estas 2 nuevas clasificaciones se pueden observar en la Figuras 6.6 y en las Tablas 6.1 y 6.2.

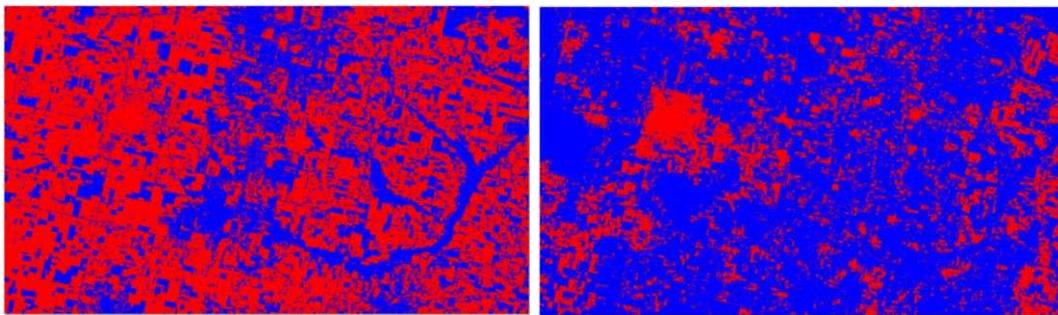


Figura 6. 6. (a) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 15/11/2014. (b) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 26/04/2016.

Los resultados de la imagen con fecha del 15/11/2014 son los siguientes:

Tabla 6. 1. Imagen 15/11/2014.

“contenido de humedad”:	Píxeles	Área [km ²]
Agua	52.6	47.3
Vegetación con agua	498.6	448.7
Suelo húmedo	233.8	210.4
“sin contenido de humedad”:	Píxeles	Área [km ²]
Urbano	22.9	20.6
Suelo seco	792.5	713.3
Vegetación	503.9	453.5
Resumen por clase	Píxeles	Área [km²]
contenido de humedad	785.129	706.6
sin contenido de humedad	1.319.431	1187.4
Total	2.104.560	1894.1

Los resultados de la imagen con fecha del 26/04/2016 son los siguientes:

Tabla 6. 2. Imagen del 26/04/2016.

“contenido de humedad”:	Píxeles	Área [km ²]
Agua	65.9	59.3
Vegetación con agua	910.2	819
Suelo húmedo	589.9	531.2
“sin contenido de humedad”:	Píxeles	Área [km ²]
Urbano	36.4	32.8
Suelo seco	166.7	150.1
Vegetación	335.1	301.6
Resumen por clase	Píxeles	Área [km²]
contenido de humedad	1.566.108	1409.5
sin contenido de humedad	538.452	484.6
Total	2.104.560	1894.1

Esta actividad permitió identificar que el límite entre un píxel con algún contenido de humedad de un píxel totalmente seco es 0.15 en valor de reflectancia del SWIR2. Cabe resaltar que la clase “vegetación” se asumió dentro de la clase “sin contenido de humedad” ya que es vegetación sana vigorosa que no se encontraba inundada.

6.4 Delimitación del triángulo producto del bi – plot entre SWIR2

Vs. NDWI

Scioli, et al. (2013) planteó la utilización de una imagen con composición falso color R: SWIR2 – G: NIR – B: NDWI (Figuras 6.7 y 6.8). Al aplicar esta configuración color, fue posible identificar fácilmente zonas con alto contenido de humedad (tonos azules), zonas anegables (tonos bordó), vegetación sana (tonos cian), y coberturas superficiales secas con bajo contenido de humedad tales como áreas urbanas o suelos secos (tonos rojos).



Figura 6. 7. Composición falso color contenido de humedad imagen 15/11/2014.



Figura 6. 8. Composición falso color contenido de humedad imagen 26/04/2016.

El bi-plot (Figuras 6.9) de cada fecha de imagen se trazó de acuerdo a un patrón que parte de identificar el quiebre de pendiente en la hipotenusa del triángulo, hasta un valor de NDWI (vegetación sana) para luego continuar con la traza de una

recta que sigue la misma pendiente del triángulo hasta el límite en reflectancia en la banda SWIR2 identificado previamente (0.15).

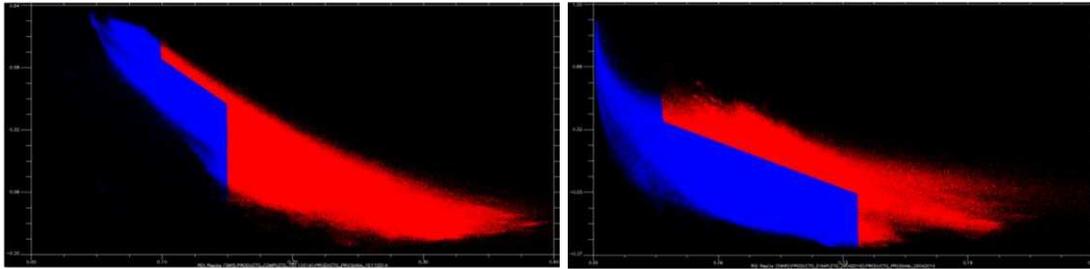


Figura 6. 9. a) Delimitación en el bi-plot imagen 15/11/2014. (b) Delimitación en la imagen 26/04/2016.

La delimitación de píxeles dentro del bi-plot se llevó a cabo con la creación de regiones de interés, que posteriormente generaron una máscara (Figuras 6.10) en donde se visualizan las localizaciones de píxeles “sin contenido de humedad” (color rojo) y “con contenido de humedad” (color azul). En las Tablas 6.3 y 6.4 se exponen los resultados obtenidos de los píxeles enmascarados por fecha de imagen.

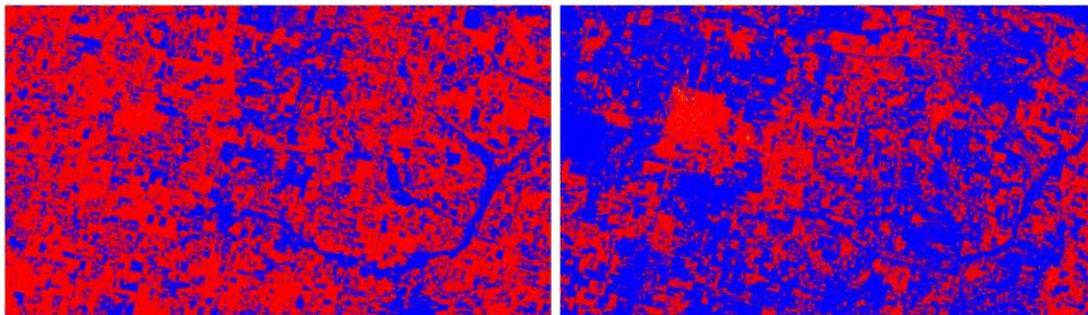


Figura 6. 10. (a) Máscara del bi-plot imagen 15/11/2014. (b). Máscara del bi-plot imagen 26/04/2016.

Tabla 6. 3. Resultados por clase de contenido de humedad en la imagen 15/11/2014.

Resumen por clase	Píxeles	Área [km ²]
contenido de humedad	776.035	698.431
sin contenido de humedad	1.328.525	1195.673
Total	2.104.560	1894.104

Tabla 6. 4. Resultados por clase de contenido de humedad en la imagen 26/04/2016.

Resumen por clase	Píxeles	Área [km²]
contenido de humedad	1.388.566	1249.7
sin contenido de humedad	715.994	644.3943
Total	2.104.560	1894.104

Según Scioli, et al. (2013), la caracterización del bi-plot generado con el NDWI y el SWIR2 resulta un método práctico y adecuado para realizar la discriminación de diversas coberturas según su contenido de humedad. Estos resultados fueron corroborados con control de campo en áreas llanas en Argentina. Sin embargo, esta tesis despertó el interés en comparar estos resultados con los productos obtenidos mediante las clasificaciones supervisadas.

6.5 Comparación con metodología Scioli

Teniendo en cuenta los resultados de la clasificación supervisada con 2 clases (con/sin contenido de humedad) para las dos imágenes, se compararon respectivamente con las máscaras que surgieron al aplicar la metodología Scioli mediante la caracterización del bi-plot. Esta actividad se realizó para visualizar las diferencias entre los dos productos por fecha de imagen de acuerdo a la cantidad de píxeles marcados con o sin contenido de humedad. Por lo cual, a mayor similitud entre las Figuras 6.11 y 6.12; fue posible inferir que las dos zonificaciones arrojaron información verídica del estado de cuenca.

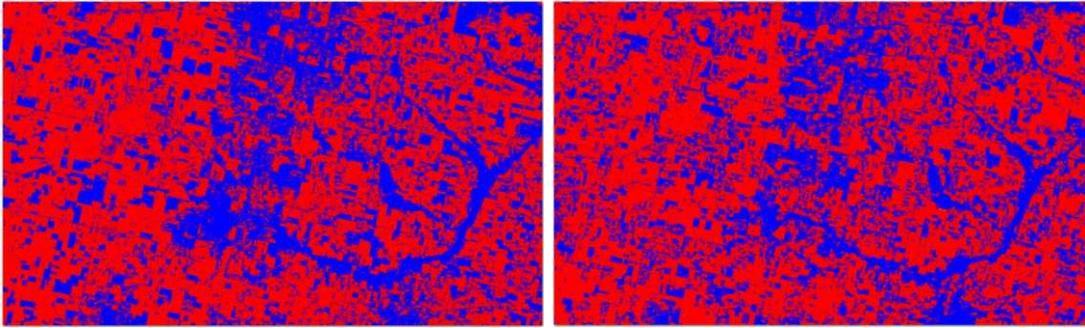


Figura 6. 11. (a) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 15/11/2014.
(b) Máscara del bi-plot imagen 15/11/2014.

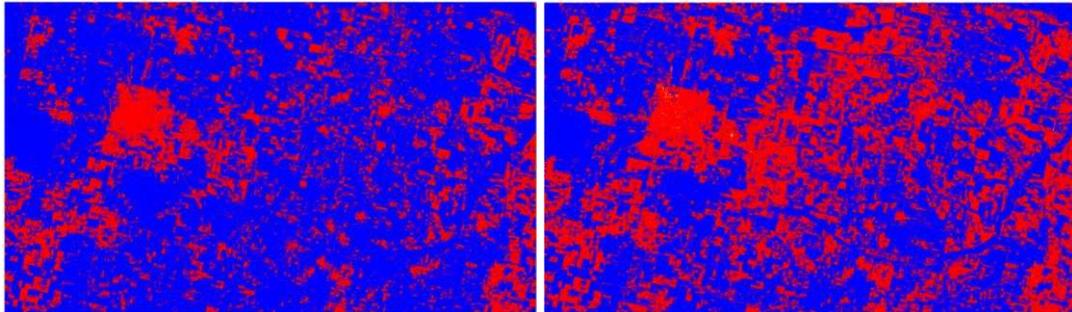


Figura 6. 12. (a) Clasificación supervisada con 2 clases imagen 26/04/2016.
(b) Máscara del bi-plot imagen 26/04/2016.

A pesar que los resultados de las imágenes expuestos en las Figuras anteriores son muy similares, existieron ciertas diferencias en la categoría “vegetación con agua”. En las imágenes esta clase se encuentra mayormente localizada en cercanías al colector principal y sobre la franja del valle aluvial. Dentro del bi-plot estos píxeles se sitúan en una zona de transición (hipotenusa del triángulo) en donde los límites planteados por Scioli, et al. (2013) son difusos. Por lo tanto, se obtuvo mayor cantidad de píxeles enmascarados con color azul en los resultados de las clasificaciones supervisadas (Figuras 6.11 a y 6.12 a) que con las máscaras generadas por los gráficos 2D (Figuras 6.11 b y 6.12 b). Para el caso de la imagen del 15/11/2014 esta diferencia fue mínima, 9.094 píxeles que corresponden a 8 [km²] aproximadamente. Mientras que en la imagen del 26/04/2016 la diferencia fue mayor con 177.542 píxeles que corresponden a 160 [km²].

Sin embargo, los resultados de aplicar el método de Scioli, et al. (2013) tuvieron como principal objetivo delimitar áreas saturadas, en función de ello los resultados obtenidos se consideraron satisfactorios por la alta correspondencia entre sí. Por lo tanto, y para continuar en el avance del entendimiento del comportamiento de las VSA's se ajustaron en el gráfico 2D (SWIR2 Vs. NDWI) los límites de variación de todas las clases con mayor detalle.

6.6 Caracterización bi-plot NDWI Vs. SWIR2

El bi-plot entre la banda del infrarrojo de onda corta versus el Índice de Humedad Diferencial Normalizado resultó adecuado para identificar VSA's en sistemas de llanura. El ploteo de ambas bandas separó agua libre y superficies saturadas de la vegetación sana y coberturas secas (p. ej. zonas urbanas). La Tabla 6.5 expone los resultados obtenidos con el respectivo rango de valores de reflectancias promedio y desviación estándar para la banda SWIR2. Las diferentes coberturas superficiales están sujetas a un valor promedio característico muestral del índice NDWI y concuerdan con los rangos de variación planteados por Kaufman, et al. (1997) para diferentes coberturas según la respuesta en reflectancia (banda SWIR2).

Tabla 6. 5. Rangos de variación según cobertura.

ID	Cobertura superficial	Rangos de variación: Promedio y desviación estándar en reflectancia en SWIR2 2.2 [μm]	Rango de variación del índice espectral NDWI
1	Agua libre	0.022 +/- 0.022	0.4 < NDWI <= 1.0
2	Suelo desnudo saturado o vegetación densa saturada	0.055 +/- 0.055	NDWI < 0 / NDWI < Límite de saturación
3	Vegetación densa no saturada	0.07 +/- 0.02	NDWI > Límite de saturación
	Vegetación moderada no saturada	0.11 +/- 0.06	NDWI > Límite de saturación

ID	Cobertura superficial	Rangos de variación: Promedio y desviación estándar en	Rango de variación del índice espectral
4	Vegetación moderada saturada	0.11 +/- 0.06	NDWI < Límite de saturación
5	Vegetación moderada o Suelo desnudo parcialmente húmedo	0.13 +/- 0.02	NDWI < 0
6	Urbano	0.17 +/- 0.06	0 < NDWI < 0.2
7	Vegetación escasa a moderada seca	0.18 +/- 0.04	NDWI < 0
8	Suelo desnudo seco (adyacente a vegetación)	0.257 +/- 0.06	NDWI < 0
9	Suelos desnudos arenosos	0.303 +/- 0.06	NDWI < 0

En la caracterización cualitativa expuesta en la Figura 6.13 se visualiza el triángulo NDWI Vs. SWIR2. A medida que disminuye la reflectancia (SWIR2), aumenta la densidad de la vegetación y en cuanto a menor reflectancia en la misma banda, mayor es el contenido de humedad.

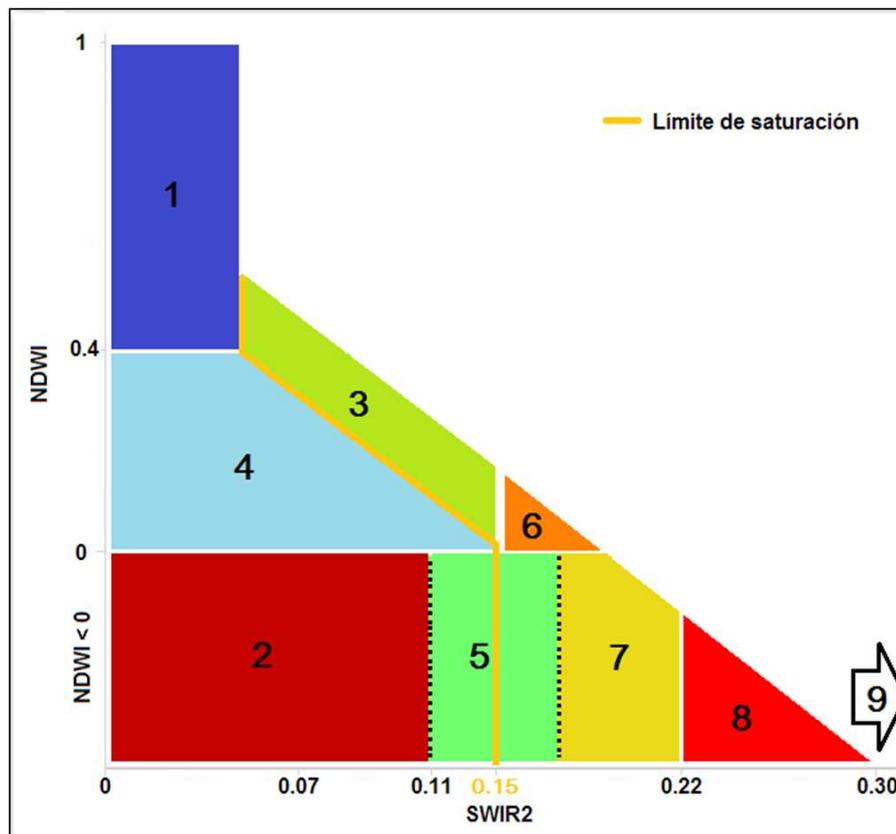


Figura 6. 13. Caracterización del triángulo generado entre el NDWI Vs. SWIR2.

El valor previamente identificado que intercepta una cobertura superficial húmeda de una cobertura superficial seca es 0.15. Los píxeles bajo la curva del límite de saturación son zonas con alto contenido de humedad que se relacionan directamente con ser VAS. No obstante, este valor es dinámico y variante que está directamente relacionado con el estado de saturación de la cuenca. Por lo tanto, se sugiere corroborar este valor con control de campo. En la zona donde se clasificó “agua libre”, la reflectancia en SWIR2 debe ser cero. Sin embargo, los resultados obtenidos para este tipo de cobertura fueron cercanos a cero. Según Kaufman, et al. (1997); obtener cierta diferencia en los valores de reflectancia en SWIR2 para el agua libre es común y se debe a la manera en que se realizó la corrección atmosférica (objeto oscuro).

El mapeo de VSA's ha sido un limitante en diferentes estudios en zonas de llanura. Por lo anterior, y con el fin de avanzar en la identificación de estas áreas, se adoptó la metodología propuesta por Scioli, et al. (2013) por la practicidad que ofrece y la facilidad de implementación del método. Sin embargo, se recomienda considerar la caracterización propuesta en esta tesis del triángulo resultante a partir del análisis de la interacción entre el NDWI y la banda SWIR2. Las zonas con identificador 1, 2, 4 y parte de la 5 del triángulo (Figura 6.13) fueron delimitadas como áreas fuentes variables porque poseen alto contenido de humedad. Los píxeles georeferenciados de estas clases fueron exportados en formato vector a un SIG que facilitó el mapeo de las VSA's. Estos productos se presentan en el Anexo 3 y fueron usados para comparar los resultados obtenidos de la aplicación del modelo hidrológico SWAT. Las Figuras 6.14 y 6.15 presentan a modo de resumen los productos obtenidos para cada fecha de imagen en pro de facilitar la visualización de los mismos.

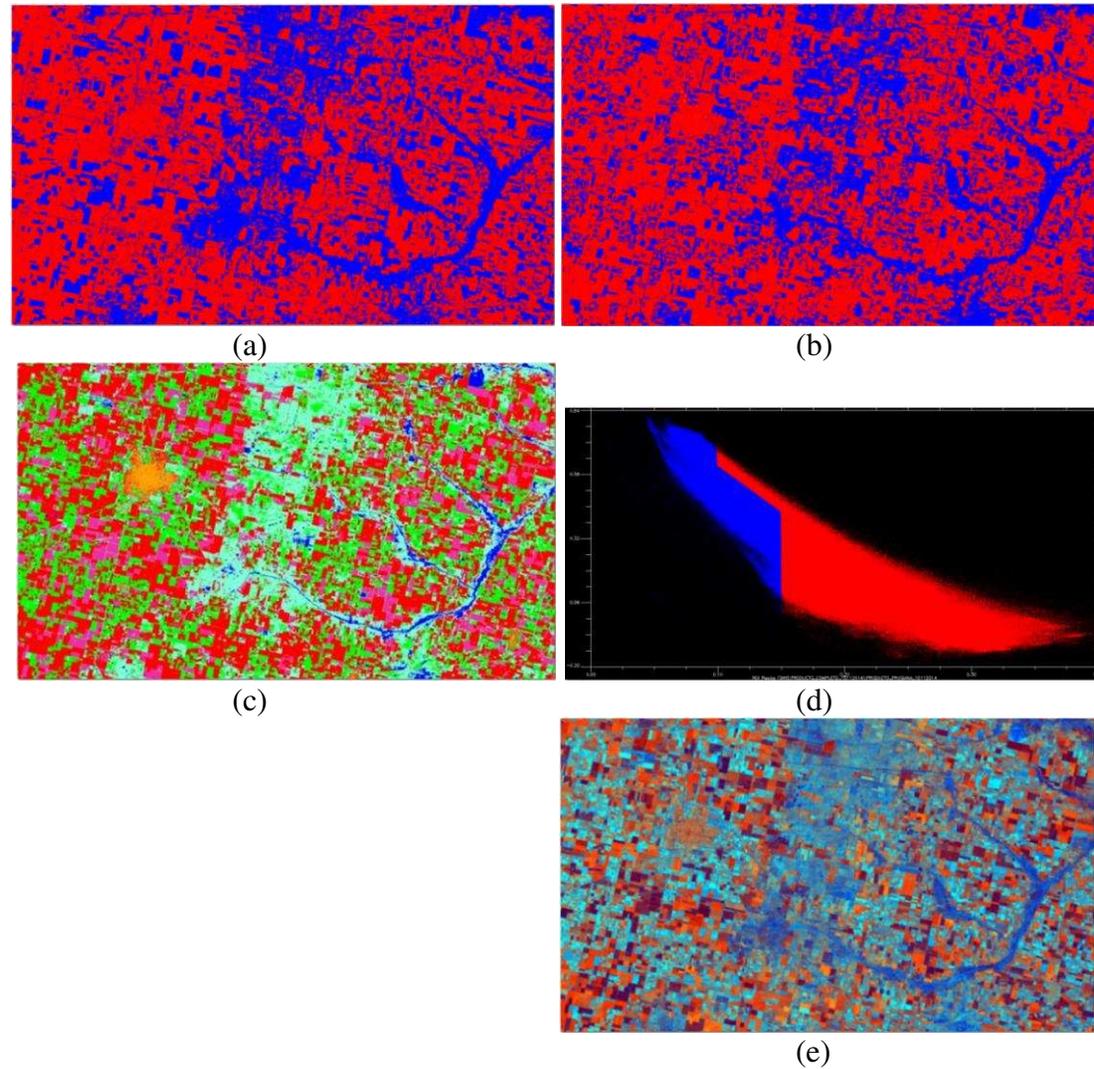


Figura 6. 14. Imagen 15/11/2014: (a) Clasificación supervisada con 2 clases. (b) Máscara bi-plot. (Scioli, 2013) (c) Clasificación supervisada con 6 clases. (d) Máscara bi-plot NDWI Vs. SWIR2. (Scioli, 2013) (e) Falso color contenido de humedad (Scioli, 2013).

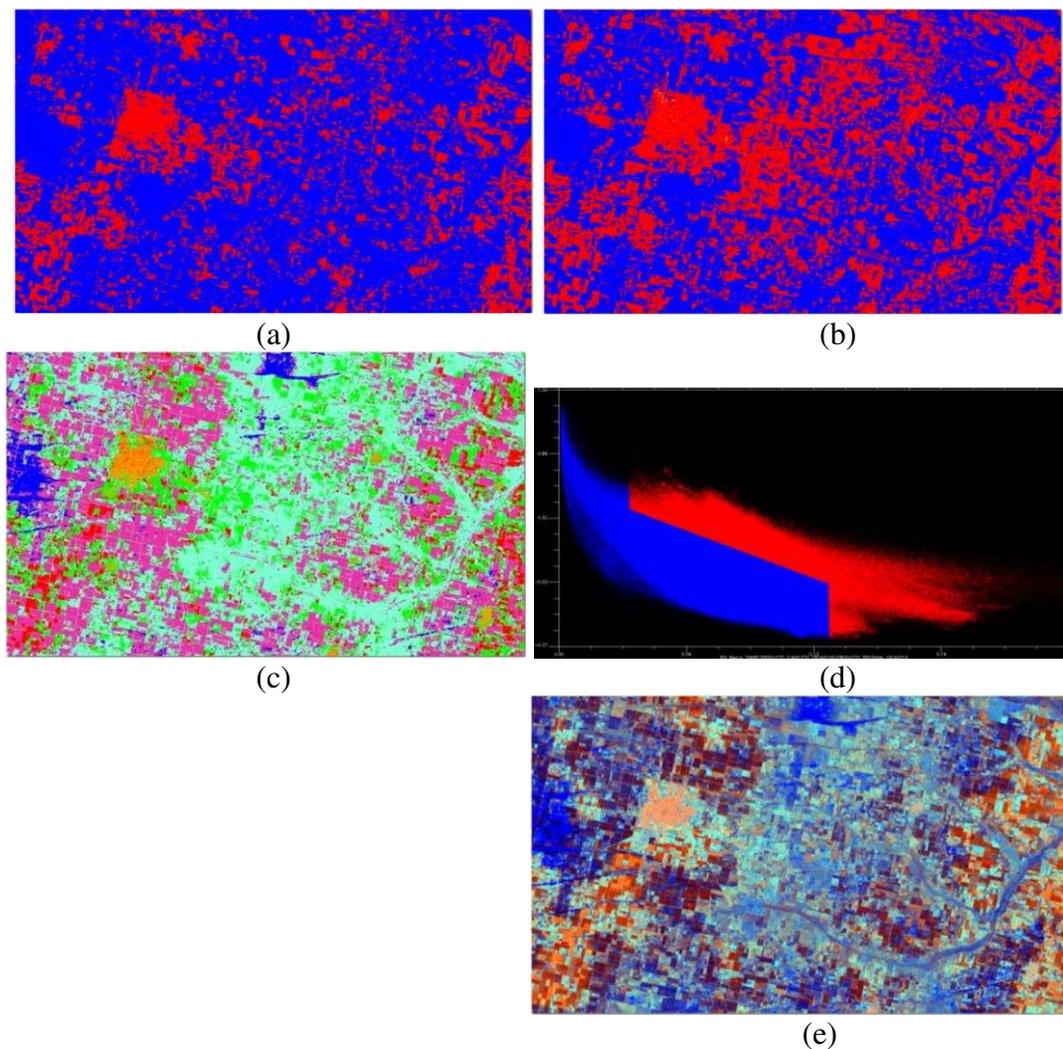


Figura 6. 15. Imagen 26/04/2016: (a) Clasificación supervisada con 2 clases. (b) Máscara bi-plot. (Scioli, 2013) (c) Clasificación supervisada con 6 clases. (d) Máscara bi-plot NDWI Vs. SWIR2. (Scioli, 2013) (e) Falso color contenido de humedad (Scioli, 2013).

Capítulo 7

Aplicación del modelo SWAT

7.1 Insumos de entrada SWAT para simular procesos hidrológicos

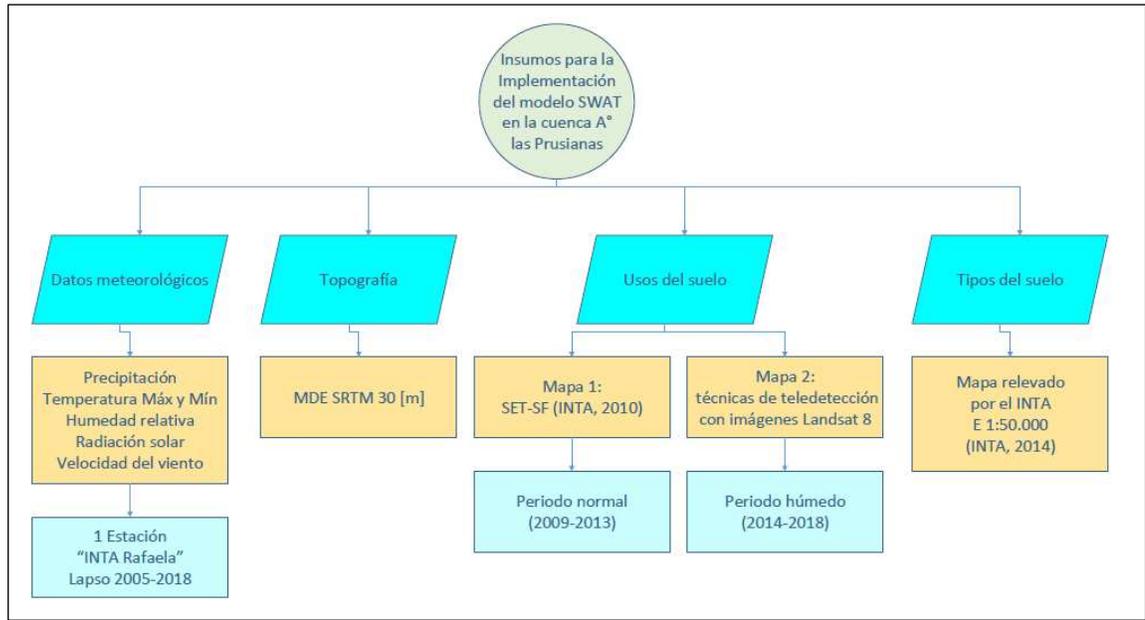


Figura 7. 1. Insumos de entrada al SWAT para simular procesos hidrológicos.

7.1.1 Información meteorológica

Se utilizaron las series de datos climáticos completos de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento (ver ítem 4.3) en el lapso 2005 al 2018 a escala diaria proporcionados por la estación agroexperimental del INTA Rafaela. La consistencia de estos datos fue analizada mediante estadísticos descriptivos y test de homogeneidad con el fin de identificar valores atípicos. Cada variable climática fue adecuada en el formato de ingreso requerido por el SWAT que es presentado en el Anexo 4, junto con el cálculo de los estadísticos del clima exigidos por el modelo. Además, se utilizó la información (curvas H-Q) de dos estaciones hidrométricas localizadas sobre la RP10 y RP70 (ver Figura 3.4).

7.1.2 Topografía

El resultado de los límites de la cuenca Arroyo las prusianas (Figura 7.2) surgió a partir del ingreso al modelo SWAT de un MDE SRTM de resolución 30 [m] seguido de un proceso de quemado de la red de drenaje. Con la aplicación de los algoritmos de flujo propios del SWAT se obtuvo un resultado correcto de cuenca fiel al patrón de la red de drenaje digitalizada manualmente. Esto debido a que el modelo SWAT funciona con el algoritmo “D8” con el cual se logró determinar satisfactoriamente los productos de dirección, acumulación del flujo y delimitar correctamente las subcuencas. Se observó que la altura máxima y mínima determinada fue de 112.7 y 43.1 [m.s.n.m] respectivamente.

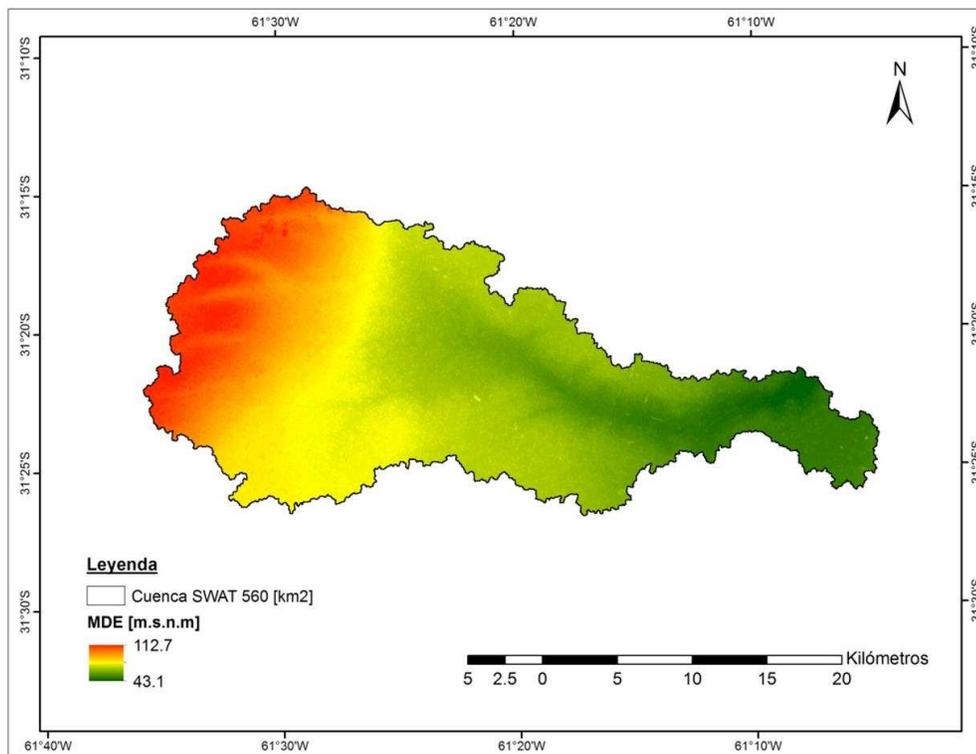


Figura 7. 2. Mapa de MDE.

La extensión del producto de cuenca Arroyo las Prusianas de ahora en adelante llamada “cuenca SWAT” es de 560 [km²]. La cuenca SWAT consta de 5 subcuencas listadas a continuación: 1 con color azul de 123 [km²], 2 con color

amarillo oscuro 59.3 [km²], 3 con color celeste 67.5 [km²], 4 con color morado de 246.2 [km²] y 5 con color bordó de 64 [km²] respectivamente (Figura 7.3).

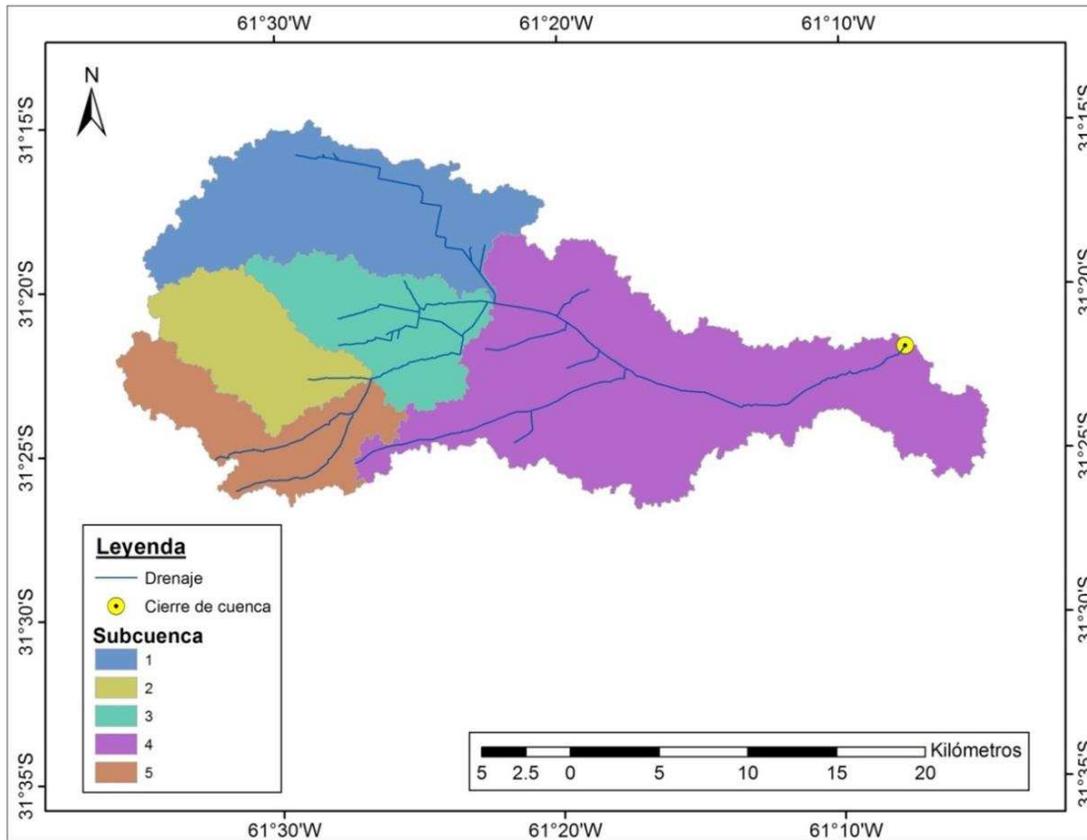


Figura 7. 3. Mapa de subcuencas, red de drenaje y cierre de cuenca.

Por otro lado, cabe resaltar que el área de la cuenca obtenida en el capítulo V fue de 568.9 [km²]; entonces, la diferencia versus la cuenca SWAT fue mínima; de aproximadamente 9 km² (Figura 7.4). La principal diferencia se identificó al sur de la cuenca en un sector que con el modelo de flujo del SWAT aportó al Arroyo las Prusianas mientras que con el acondicionamiento de la topografía de forma manual se determinó que ese sector aporta fuera de los límites de cuenca.

No obstante, esta diferencia no fue suficiente para no aceptar la delimitación realizada dentro de la interfaz del SWAT.

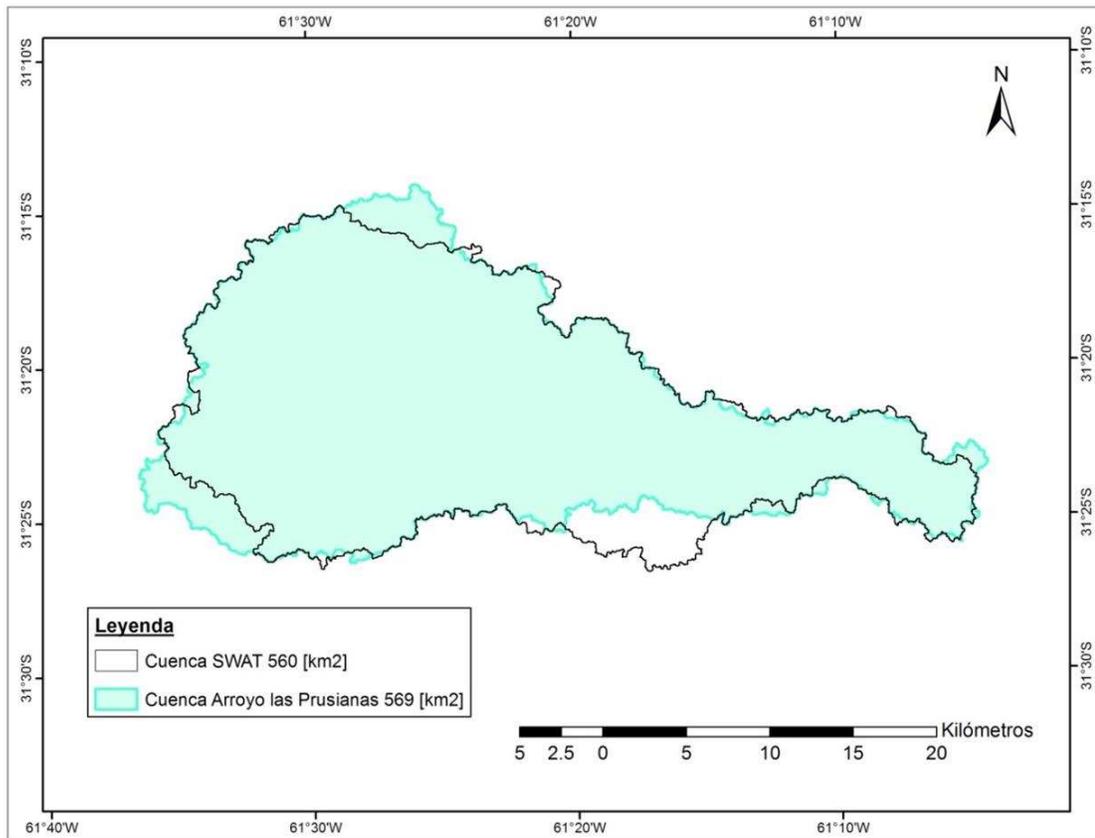


Figura 7. 4. Comparación límites de cuenca.

La máxima pendiente en la cuenca SWAT es de 17.5%; se encontró en la zona elevada donde se emplaza la ciudad de Rafaela. En promedio, las pendientes oscilan entre 1 y 2%. En base al MDE SRTM 30 [m] modificado, se caracterizaron 4 rangos de pendientes: 0–1%, 1 – 2%, 2 – 5% y una clase con pendientes superiores al 5%. De acuerdo con la Tabla 7.1 y la Figura 7.5, existe un predominio del 87% de valores de pendientes características de una zona de llanura (inferiores al 2%).

Tabla 7. 1. Rangos de pendientes.

No.	Rango %	Área [km ₂]	Área [%]
1	0 -- 1	301.79	54%
2	1 -- 2	185.39	33%
3	2 -- 5	71.2	12.7%
4	> 5	1.62	0.3%
	Total	560	100.0%

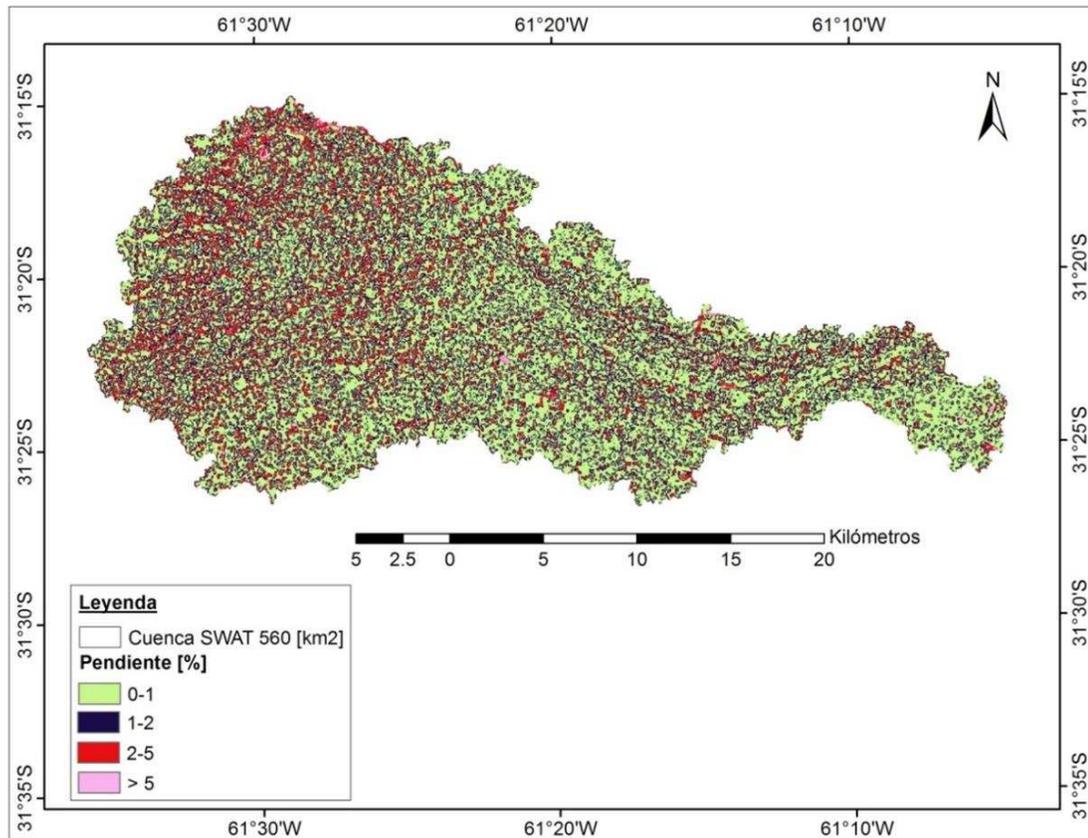


Figura 7. 5. Mapa con valores de pendientes presentes en la cuenca.

7.1.3 Usos del suelo

Se utilizaron dos mapas con los usos del suelo según la metodología presentada en el apartado 4.3. Para los cuales fueron ingresados al SWAT todos los parámetros y características por base de datos del usuario y se les asignaron códigos genéricos reconocidos por el modelo para realizar los cálculos internos.

Es importante resaltar que para cada clase descrita en los mapas, se ingresaron todos los valores característicos a la base de datos de usuario del SWAT y para cada una de ellas se adoptó un código genérico reconocido por el modelo (p. ej. URML). Los valores de cada clase fueron determinados en base a mediciones proporcionadas por el INTA, tablas bibliográficas y también de acuerdo con la respuesta hidrológica real observada haciendo uso de técnicas de teledetección (Tabla 7.2).

APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

Tabla 7. 2. Usos del suelo y/o coberturas implementados en el modelo SWAT.

Descripción			Código genérico SWAT			
Urbanización de baja a media densidad			URML			
Suelo desnudo			SWRN			
Ganadería con restricción			PAST			
Agricultura – Ganadería, con restricciones			AGRL			
Ejes de concentración de aguas			WETF			
Cuerpos de agua libre			WATR			
SWAT						
Código genérico SWAT	Área mapa 1 [km ²]	Área mapa 2 [km ²]	CN			
			A	B	C	D
URML	15.32	13.53	98			
SWRN	26.87	5.30	39	61	74	80
PAST	76.37	87.55	49	69	79	84
AGRL	187.2	164	67	77	83	87
WETF	236.3	251.25	92			
WATR	17.94	38.37	96			

El mapa 1 se presenta en la Figura 7.6 y el mapa 2 en la Figura 7.7. En los dos mapas predominan las clases correspondientes a “Ejes de concentración de aguas” (WETF) y “Agricultura – Ganadería, con restricciones” (AGRL). También se puede apreciar que la mayor diferencia entre sí se presenta para las clases “Suelo desnudo” (SWRN) y “Cuerpos de agua libre” (WATR); ya que en el segundo mapa la napa se encuentra en cercanías a la superficie o incluso en superficie. Como se observa en la Tabla 7.3, la mayor diferencia entre los 2 mapas se observa principalmente en la clase de cuerpos de agua libre ya que aumento aproximadamente el doble en el mapa 2 (periodo húmedo) con respecto al mapa 1 (periodo normal).

APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

Tabla 7. 3. Área según cobertura superficial mapa 1 y 2 de usos del suelo.

Clase (Código genérico SWAT)	Área Mapa 1 km ²	Área Mapa 2 km ²
Urbanización de baja a media densidad (URML)	15.32	13.53
Suelo desnudo (SWRN)	26.87	5.3
Ganadería con restricción (PAST)	76.37	87.55
Agricultura - Ganadería, con restricciones (AGRL)	187.2	164
Ejes de concentración de aguas (WETF)	236.3	251.25
Cuerpos de agua libre (WATR)	17.94	38.37

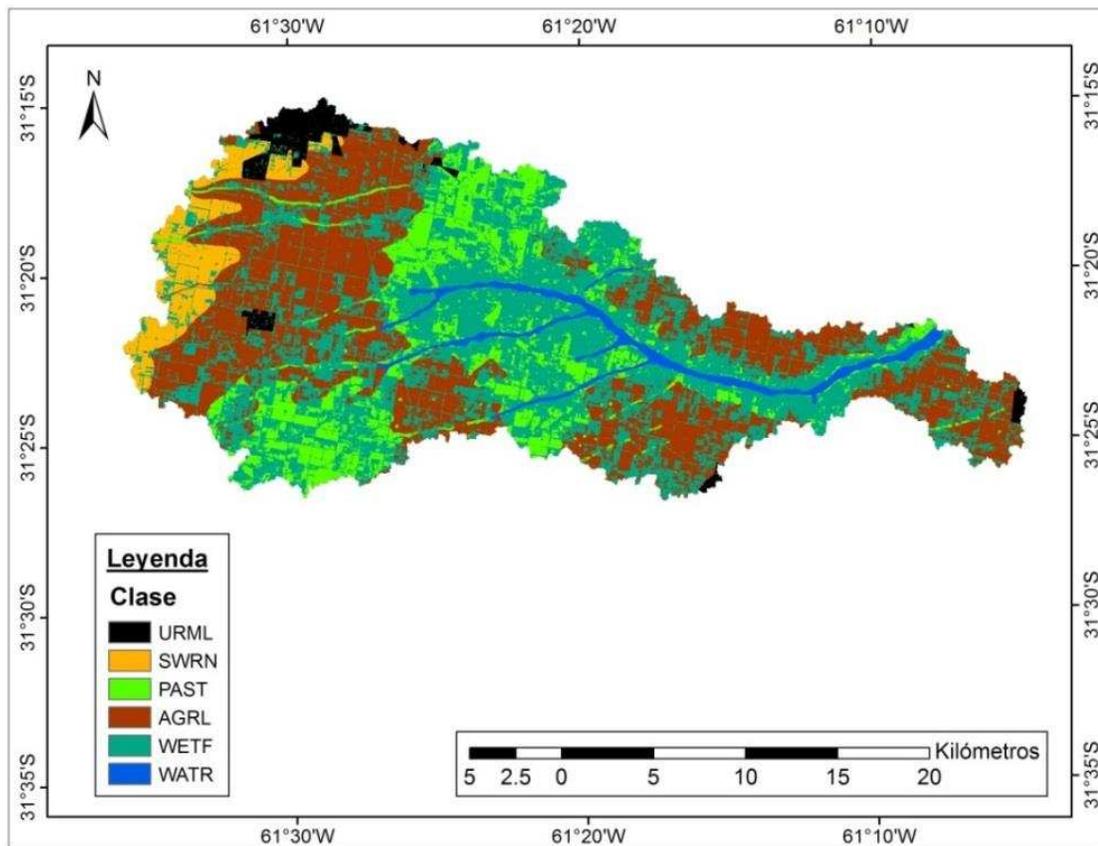


Figura 7. 6. Mapa 1 de usos del suelo modificado del SET-SF, periodo normal.

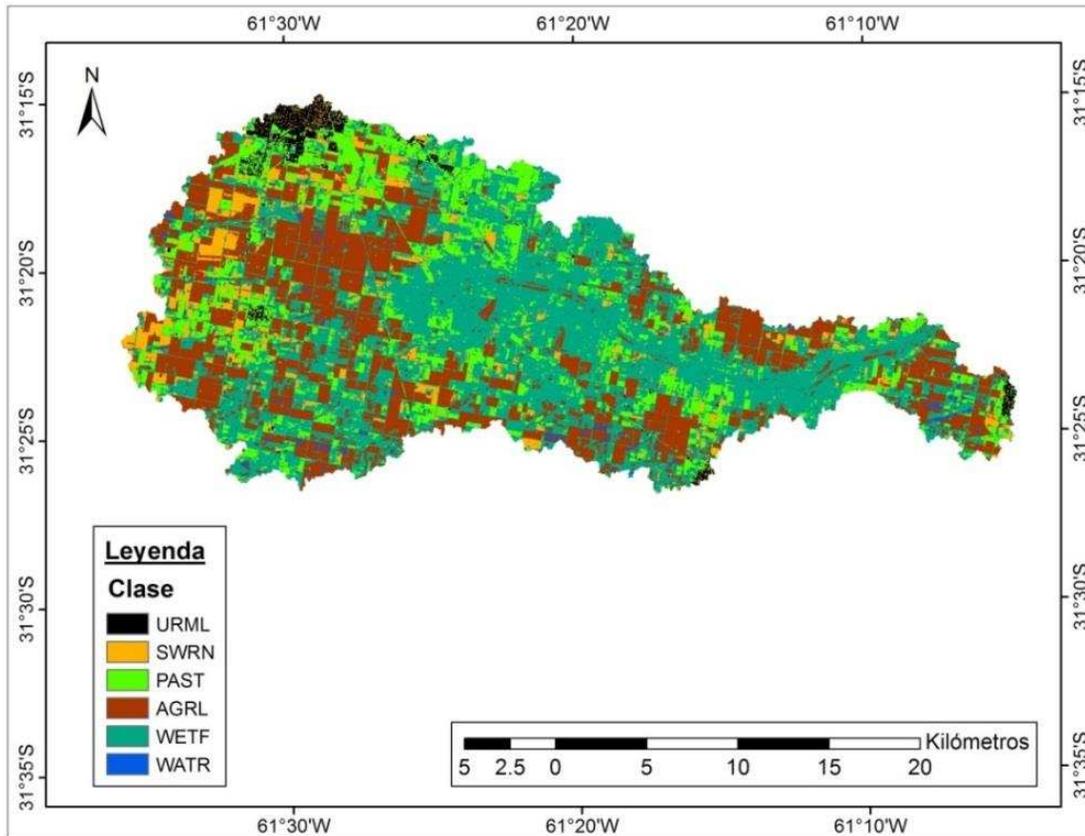


Figura 7. 7. Mapa 2 de usos del suelo sensores remotos, periodo húmedo.

7.1.4 Tipos del suelo

El mapa de tipos de suelos a escala 1:50.000 se obtuvo del INTA. En total se ingresaron al modelo 10 series de suelos. Igual que con los mapas de usos del suelo, en este caso se ingresaron por base de datos del usuario todas las características de las series de tipos de suelos en donde predominan suelos Natracualfes, Argiudoles y Natralboles con textura franco limosa y drenaje pobre que dificultan el movimiento del agua. Las series más importantes son las de RAFAELA y AURELIA que representan el 50 % de la cuenca aproximadamente (Tabla 7.4). Estos suelos cuentan con un horizonte que dificulta el movimiento del agua y para mayor complejidad hidrológica presentan baja tasa de infiltración cuando se encuentran totalmente húmedos.

Con el fin de de estudiar la hidrodinámica en la zona no saturada en suelos Argiudoles, Weinzettel y Usunoff (2005) determinaron mediante ensayos en parcelas experimentales que la capacidad de campo de estos suelos a una profundidad de 60 [cm] y una presión de 30 [Kpa] no supera el 38 % y la reserva útil de agua aproximadamente es de 48 [mm].

Según Weinzettel y Usunoff (2005) existe presencia de posibles flujos preferenciales que producen el ascenso del nivel freático antes de la saturación del perfil de estos suelos, al menos para épocas muy secas. La descripción y las propiedades hidráulicas de cada horizonte de cada serie de suelo se presentan en la Tabla A 4.1. Como se puede observar en la Tabla 7.4 y Figura 7.8, la serie Rafaela representa un 26.4% (147.83 km²) del área total de la cuenca, seguida de Aurelia con 24.7% (138 km²), Esperanza con 13.6% (76.16 km²), Santa María Norte con 12.25% (68.60 km²), Prusianas con 11.81% (66.16 km²), Pilar con 4.07% (22.83 km²), Lehmann con 3.76% (21.08 km²), Colector las Prusianas con 2.11% (11.82 km²), Castellanos con 1.17% (6.59 km²) y finalmente las Tunas con 0.13% (0.97 km²).

Tabla 7. 4. Área según tipo de suelo.

No.	Serie de suelo	Área [km ₂]	Área [%]
1	Rafaela	147.83	26.4%
2	Aurelia	138	24.7%
3	Esperanza	76.16	13.6%
4	Santa María Norte	68.6	12.3%
5	Prusianas	66.16	11.8%
6	Pilar	22.83	4.1%
7	Lehmann	21.08	3.8%
8	Colector las Prusianas	11.82	2.11%
9	Castellanos	6.59	1.17%
10	Tunas	0.97	0.13%
		560	100.0%

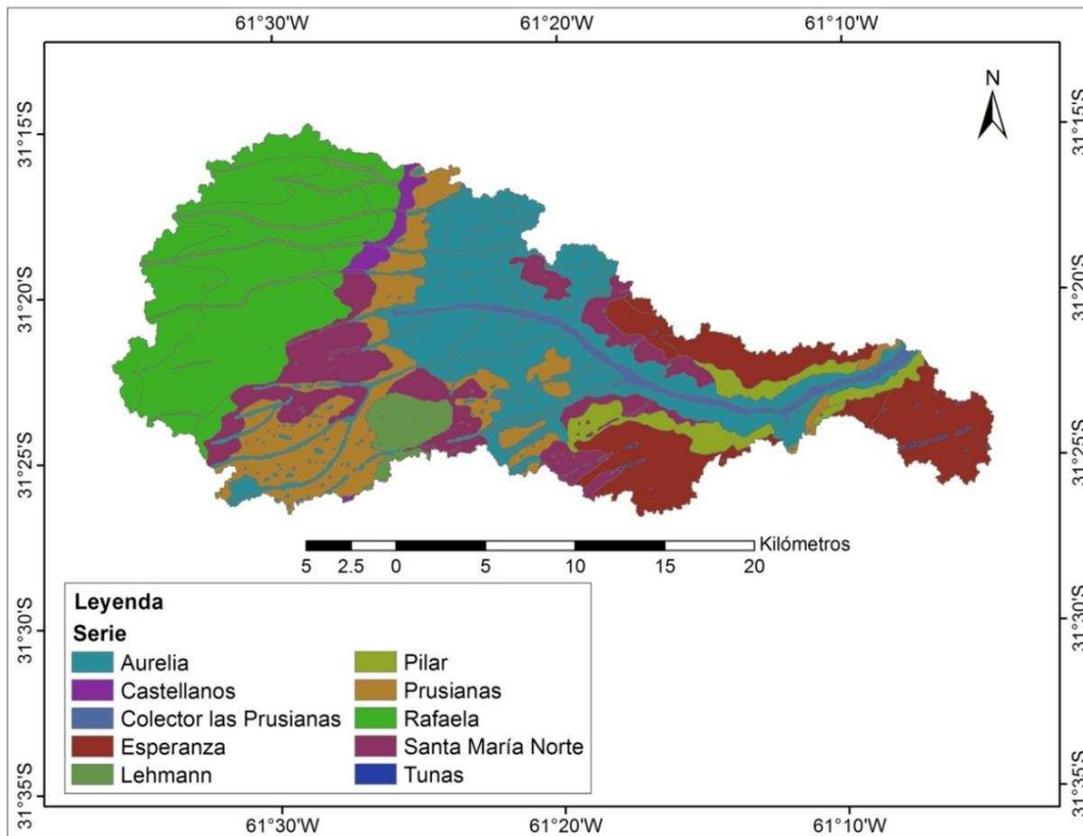


Figura 7. 8. Mapa de Tipos de suelos.

7.2 Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU)

A partir de la combinación entre el mapa de pendientes, usos y tipos del suelo se generó el mapa de HRU's con 395 unidades en total (ver Tabla A 4. 8). En la Tabla 7.5 y Figura 7.9 se pueden observar las subcuencas con sus principales características. La subcuenca 4 (103 HRU's) presentó la mayor variabilidad debido a su extensión; mientras que las subcuencas 2 (65 HRU's), 3 (69 HRU's) y 5 (72 HRU's) tuvieron similar variación ya que comparten los mismos usos y tipos del suelo que se encuentran sobre el bloque elevado (falla Rafaela). La subcuenca 1 (86 HRU's) tuvo incidencia de la zona urbanizada de Rafaela y por ende, a pesar de tener combinaciones compartidas con las subcuencas 2, 3 y 5; las superó en HRU's.

APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

Tabla 7. 5. Principales características de las subcuencas.

Número de Subcuenca	Área [km ²]	Perímetro [km]	Pendiente [m/m]	Elevación [m.s.n.m]	Cantidad HRU's
1	123	104.46	0.00131	85.69	86
2	59.3	56.16	0.00172	89.01	65
3	67.5	67.08	0.00141	74.31	69
4	246.2	180.66	0.00215	59.86	103
5	64	86.94	0.00076	83.06	72

Mediante el modelo SWAT se generó un mapa con la totalidad de combinaciones únicas entre usos del suelo – tipos del suelo y pendientes. Estas unidades resultantes son hidrológicamente similares u homogéneas (Her et al, 2015). En cada una de ellas el SWAT determinó el balance hídrico a partir de la información ingresada. A continuación, se presenta la distribución espacial (Figura 7.9) de las 20 principales combinaciones de HRU's con sus respectivas características (Tabla 7.6).

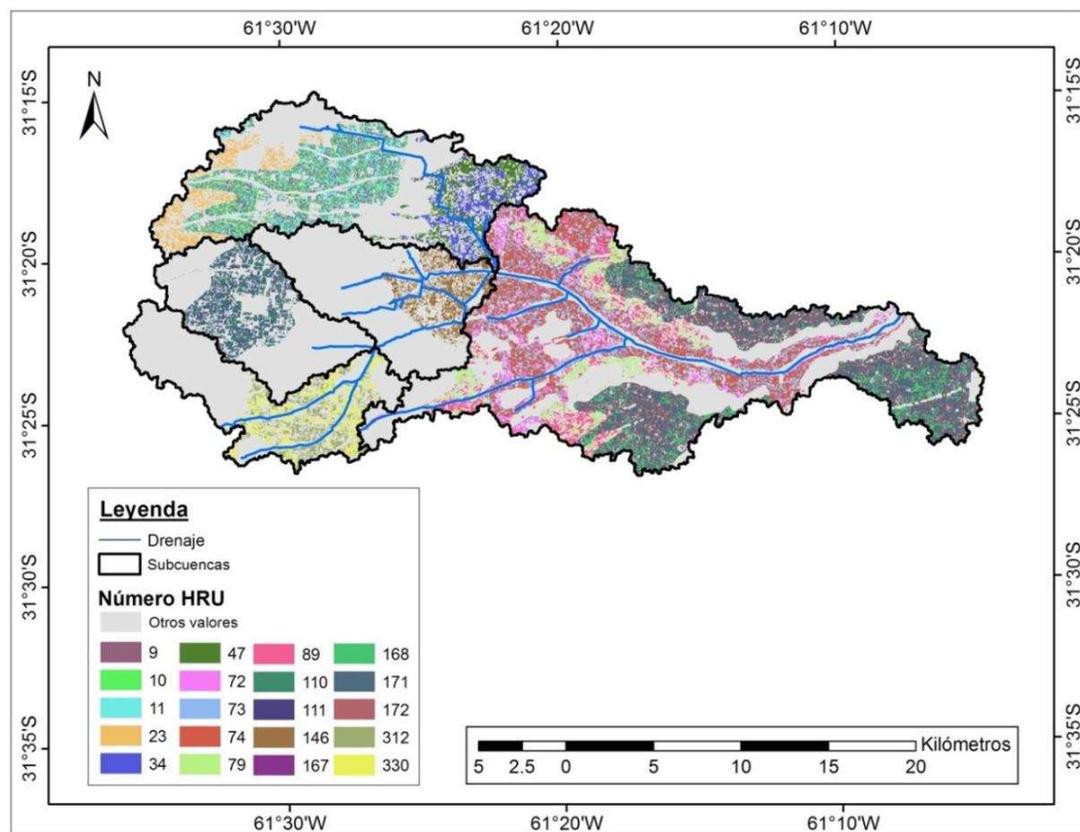


Figura 7. 9. Distribución espacial Principales 20 HRU's.

Tabla 7. 6. Características de las principales 20 HRU's.

Número de HRU	Área [km ²]	Uso del suelo	Serie de suelo	Rango pendiente [%]
74	34.29	WETF	AURELIA	0 - 1
171	30.57	AGRL	ESPERANZA	0 - 1
73	19.74	WETF	AURELIA	1 - 2
168	15.53	WETF	ESPERANZA	0 - 1
172	14.63	AGRL	ESPERANZA	1 - 2
11	14.38	AGRL	RAFAELA	0 - 1
9	12.67	AGRL	RAFAELA	1 - 2
72	10.37	PAST	AURELIA	0 - 1
79	8.73	WETF	SANTA MARÍA NORTE	0 - 1
146	8.69	WETF	AURELIA	0 - 1
89	8.54	AGRL	SANTA MARÍA NORTE	0 - 1
34	7.96	WETF	AURELIA	0 - 1
167	7.93	WETF	ESPERANZA	1 - 2
110	7.89	AGRL	RAFAELA	0 - 1
47	7.80	PAST	AURELIA	0 - 1
330	7.28	WETF	PRUSIANAS	0 - 1
111	7.19	AGRL	RAFAELA	1 - 2
312	7.07	PAST	PRUSIANAS	0 - 1
23	7.07	SWRN	RAFAELA	0 - 1
10	6.97	AGRL	RAFAELA	2 - 5

La combinación que prepondera en la cuenca Arroyo las Prusianas se compone de un rango de pendiente entre 0-1%, un uso de suelo WETF y la serie de suelo Aurelia. Este HRU (No. 74) se extiende sobre 34.29 [km²]. Sin embargo, hay que tener presente que los HRU's no tienen conectividad hidráulica alguna y por ende impiden la representación de las VSA's en la zona de llanura.

Se concluye que la aplicación de umbrales en el proceso de definición del HRU conduce a la pérdida considerable de información del paisaje debido a que aplicando algún umbral, se uniformiza la cuenca hidrográfica con las combinaciones dominantes. Además, se determinó que la capa más sensible a los umbrales es correspondiente al tipo de suelos (Anexo 4).

7.3 Resultados del modelo SWAT

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del modelo SWAT, en primer lugar, se describen los parámetros calibrados y los ajustes de los flujos superficiales. Posteriormente se presentan los diversos escenarios de simulación, seguido de un análisis del fenómeno de VSA's teniendo en cuenta los niveles freáticos registrados y la evolución del caudal simulado versus el observado en los periodos de calibración y validación. Finalmente se presentan los resultados del balance hídrico a escala promedio anual y mensual.

La simulación se realizó para un periodo de 14 años (2005 – 2018) a escala de tiempo diaria utilizando diversas técnicas de modelación. Se tomó un periodo de calentamiento de 4 años (2005 – 2008); de acuerdo con Abbaspour (2007) se recomienda como mínimo de 2 a 3 años de calentamiento para la estabilización de las condiciones iniciales del contenido de agua en el suelo. La calibración se efectuó entre 2009 – 2013 y la validación en los años 2014 – 2018.

7.3.1 Parámetros obtenidos en la calibración del flujo superficial

Para calibrar el modelo se realizó un análisis de sensibilidad (ver Figura A 4.15) por medio del SWAT-CUP en el que se encontró que principalmente 24 parámetros eran sensibles ya que controlaban la respuesta de la cuenca Arroyo las Prusianas. Sin embargo, variando 19 de los 24 parámetros, el modelo arrojó un ajuste aceptable. Los 3 parámetros más sensibles se describen a continuación. ALPHA_BF: controla el flujo base, SOL_AWC: representa la capacidad de agua disponible de la capa del suelo, ESCO: representa el factor de compensación de la evaporación del suelo.

A partir de este análisis se confirmó la importancia de los parámetros que controlan el flujo subterráneo y los que repercuten en la componente vertical del movimiento de agua. Los resultados obtenidos de los parámetros en la calibración se presentan en la Tabla 7.7, acompañados de su respectiva descripción, rangos en que variaron, método usado y valor calibrado. Los métodos de variación usados son 2 (relativo o reemplazar). Cuando es relativo significa que la variación del parámetro es porcentual, mientras que al usar el método reemplazar el valor del parámetro es fijado por consola por el modelista.

APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

Tabla 7. 7. Parámetros de calibración del SWAT y su rango de ajuste.

Parámetro	Descripción	Rango de sensibilidad	Método	Mín.	Máx.	Valor
UNIDAD DE RESPUESTA HIDROLÓGICA (.hru)						
SLSUBBSN	Longitud media de la pendiente [m]	11	Reemplazar	10	150	59.12
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo [fracción]	3	Reemplazar	0	1	0.86
SLSOIL	Longitud de la pendiente del flujo lateral [m]	5	Reemplazar	0	150	2.31
SUELO (.sol)						
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada [mm/h]	15	Relativo	-0.5	0.5	0.12
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa [mm]	9	Relativo	-0.3	0.3	0.02
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa del suelo [mm _{H2O} /mm _{suelo}]	2	Relativo	-0.5	0.5	0.48
CUENCA (.bsn)						
SURLAG	Tiempo de retardo de la escorrentía superficial [n/a]	17	Reemplazar	0.05	24	23.52
CNCOEF	Coefficiente del CN relacionado a la evapotranspiración de las plantas [n/a]	14	Reemplazar	0.5	2	1.81
EPCO	Factor de compensación de absorción de la planta [n/a]	18	Reemplazar	0	1	0.29
TRNSRCH	Pérdidas por transmisión desde el canal al acuífero confinado [fracción]	6	Reemplazar	0	1	0.05
EVRCH	Factor de ajuste de evaporación en canal [n/a]	13	Reemplazar	0	1	0.53
FFCB	Almacenamiento inicial del agua del suelo [fracción]	16	Reemplazar	0	1	0.54
AGUA SUBTERRÁNEA (.gw)						
GWQMN	Umbral de almacenamiento de agua en el acuífero libre [mm _{H2O}]	4	Reemplazar	0	5000	1380
GW_DELAY	Retraso del agua subterránea [días]	10	Reemplazar	0	500	376
GW_REVAP	Coefficiente de revaporización del agua subterránea [n/a]	12	Reemplazar	0.02	0.2	0.08
REVAPMN	Umbral de almacenamiento de agua en el acuífero libre para “revap” [mm]	19	Reemplazar	0	500	121
ALPHA_BF	Factor alpha de flujo base [días]	1	Reemplazar	0	1	0.58
RCHRG_DP	Fracción de percolación al acuífero confinado [fracción]	8	Reemplazar	0	1	0.81
MANEJO (.mgt)						
CN2	Número de Curva SCS inicial para la condición de humedad II [n/a]	7	Relativo	-0.35	0	-0.23

7.3.2 Ajuste de los caudales superficiales

El lapso en que se efectuó la calibración (2009 – 2013) fue asumido como un periodo relativamente normal (profundidad del NF > 2 [m]) y para la validación (2014 – 2018) se consideró el periodo como relativamente húmedo (profundidad del NF < 2 [m]). Para valorar el ajuste entre los caudales observados versus los simulados con el modelo SWAT, se utilizaron los estadísticos: coeficiente NS (Nash y Sutcliffe, 1970), coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo porcentual (Pbias).

En la Tabla 7.8 y las Figuras 7.10 y 7.11 se presentan los resultados de los estadísticos y la evolución de los hidrogramas obtenidos en la sección de control para los periodos de calibración y validación. En la Figura 7.10 se puede observar que el periodo tomado para la calibración es homogéneo, mientras que a partir del año 2014 (Figura 7.11) el comportamiento de la cuenca cambia porque interviene el proceso de VSA's. Igualmente, se puede observar que en diversas oportunidades el NF se encuentra en cercanías o directamente sobre la superficie del terreno.

Tabla 7. 8. Análisis estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT en el punto de control para los periodos de calibración y validación.

Estadístico	SWAT
Calibración (2009-2013)	
NS	0.69
R^2	0.7
Pbias	4.9
Validación (2014-2018)	
NS	0.48
R^2	0.50
Pbias	15.9

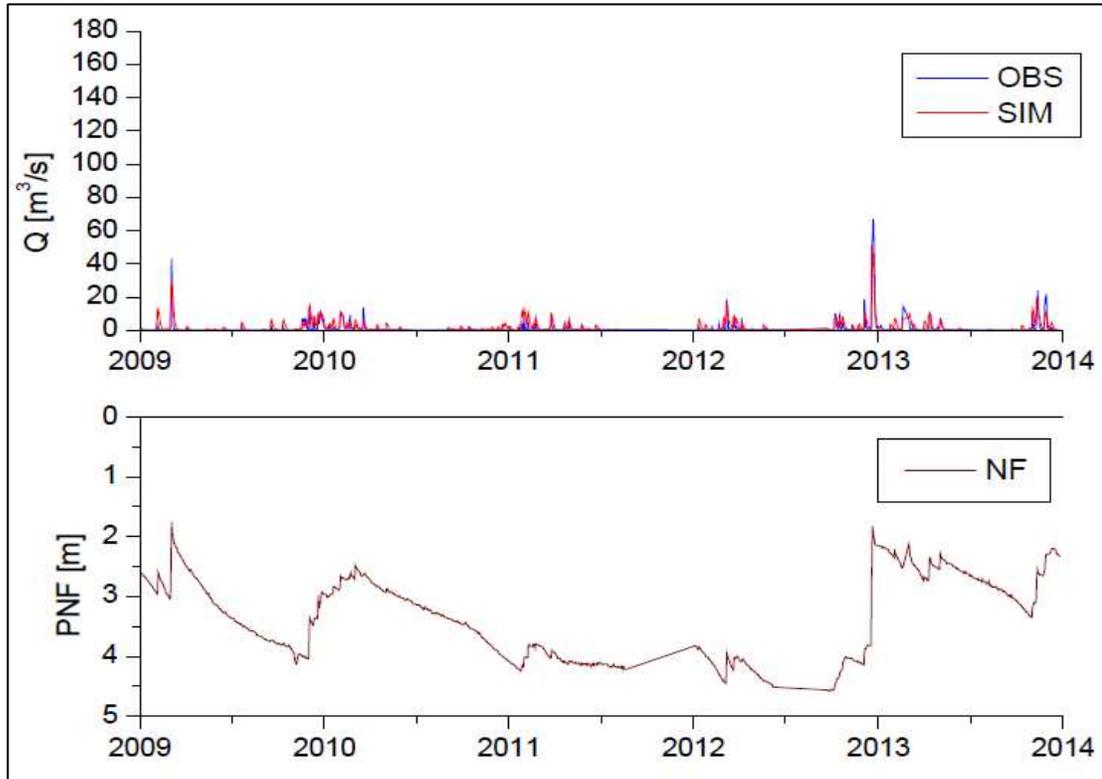


Figura 7. 10. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Periodo calibración.

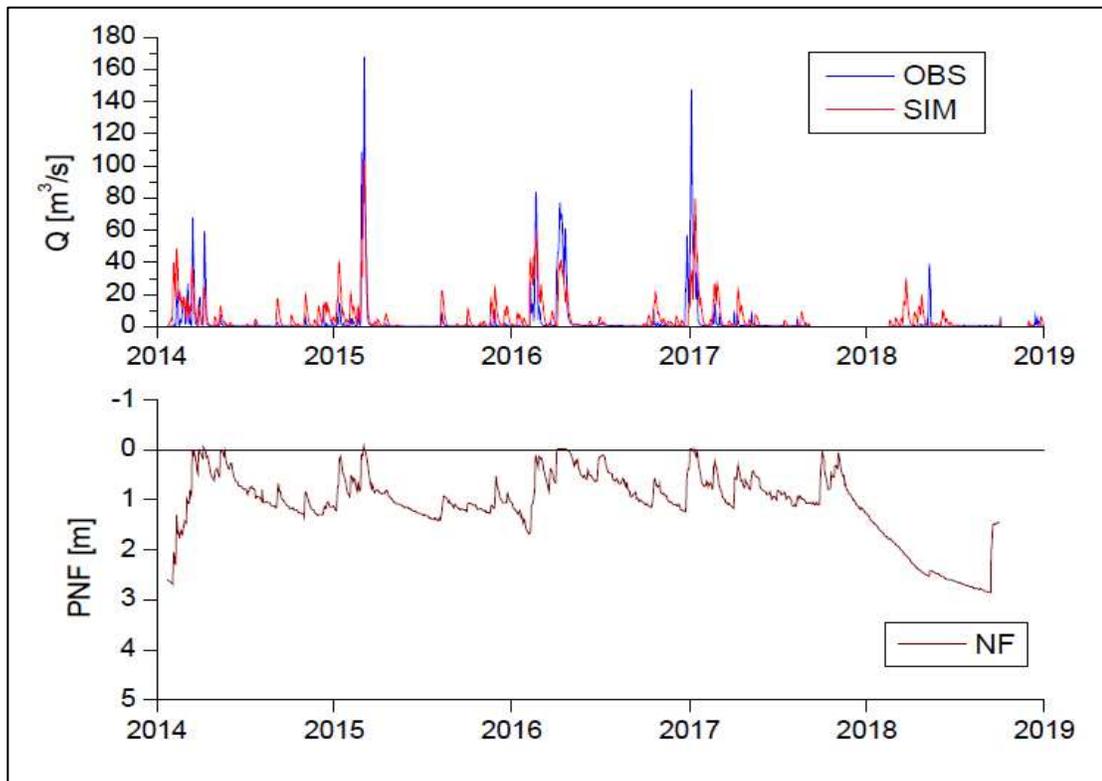


Figura 7. 11. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Periodo validación.

Los resultados obtenidos en la etapa de calibración son satisfactorios, el modelo representó adecuadamente los procesos de flujo diario en la cuenca Arroyo las Prusianas ya que se obtuvo un $NS \geq 0.5$ (NS 0.69) (Moriassi et al, 2007).

El pbias representa la tendencia promedio de los caudales simulados a ser mayores o inferiores que los caudales observados. El valor óptimo del estadístico pbias es “0”, valores positivos del pbias indican subestimación del modelo y valores negativos simbolizan sobrestimación de los caudales simulados (Moriassi et.al., 2007). El resultado del pbias para el periodo de calibración fue 4.9, esto quiere decir que los caudales fueron subestimados con respecto a los caudales observados. Sin embargo, es importante hacer hincapié *que en este periodo la cuenca no estaba gobernada por el fenómeno de VSA's*. Por otro lado, en el periodo de validación la eficiencia del modelo disminuyó a un NS de 0.48 porque aparecieron las VSA's y el comportamiento de la cuenca fue fuertemente no lineal. En este caso, el ajuste obtenido se logró a partir de implementar diversas técnicas de modelación en base a contemplar los resultados de 3 escenarios explicados en el siguiente apartado.

El SWAT no contempla el flujo superficial por saturación característico de las VSA's, razón principal por la cual no se alcanzó un ajuste alto en los caudales picos. Estas diferencias entre los caudales observados y los simulados se dieron también por la fuerte no linealidad entre la precipitación neta y la escorrentía cuando inciden las VSA's como se demostró en el apartado 3.2.3. Las VSA's provocaron en este periodo que la respuesta de la cuenca Arroyo las Prusianas estuviera gobernada por el flujo superficial por el mecanismo de saturación. Se resalta entonces que particularmente los caudales picos en el periodo de validación no fueron alcanzados por el hecho de la presencia del fenómeno de VSA's.

En esta tesis se concluyó que cuando las VSA's aparecen (NF en proximidad a la superficie) cambia el uso del suelo, la respuesta de la precipitación y la escorrentía se convierte en fuertemente no lineal. Esto genera que varíe drásticamente el coeficiente de escorrentía según un evento. Además, la capacidad de almacenamiento del perfil disminuye, la saturación del perfil del suelo es inevitable y con cualquier evento de lluvia por baja que sea su intensidad pueden generarse crecidas importantes. En estos casos el flujo superficial por saturación gobierna la respuesta de la cuenca producto del efecto de las VSA's que causan que los procesos verticales que normalmente son preponderantes en una zona llana pierdan relevancia.

7.3.3 Representación de VSA's con el SWAT

La simulación se realizó contemplando tres (3) escenarios en donde se optó por diversas técnicas de calibración con el fin de representar correctamente el comportamiento del sistema.

En el primer escenario corresponde al periodo completo inicial de simulación (2005-2018). Teniendo en cuenta un calentamiento de 4 años y utilizando el mapa 1 confeccionado para un periodo normal no fue posible obtener un ajuste en la respuesta de la cuenca Arroyo las Prusianas por la alta no linealidad entre la lluvia neta y el escurrimiento atribuido por el fenómeno de VSA's como se puede observar en la Tabla 7.9 y Figura 7.12.

Tabla 7. 9. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 1.

Estadístico	SWAT
Periodo completo inicial (2009-2018)	
NS	0.41
R ²	0.48
Pbias	19.2

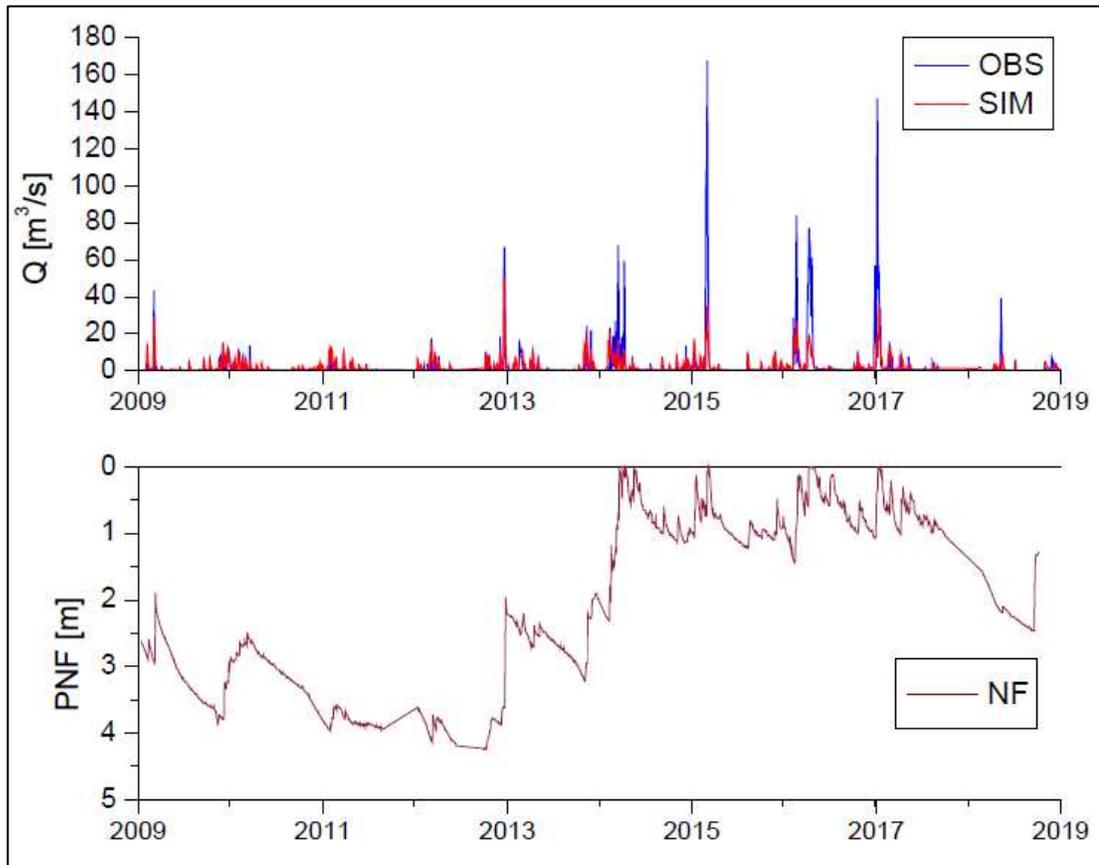


Figura 7. 12. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 1.

Para el segundo escenario se contempló un periodo de calentamiento de 4 años (2005-2008) y se dividió el periodo de simulación en dos etapas (pero utilizando el mapa 1 confeccionado para un *periodo normal*). La primera etapa correspondió al periodo de calibración de 5 años (2009-2013) donde la Profundidad del NF > 2 [m] y para el cual, los parámetros determinados poseen significado físico debido a que no interviene el proceso de VSA's.

Tabla 7. 10. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 2 periodo normal.

Estadístico	SWAT
Periodo normal (2009-2013)	
NS	0.69
R ²	0.7
Pbias	4.9

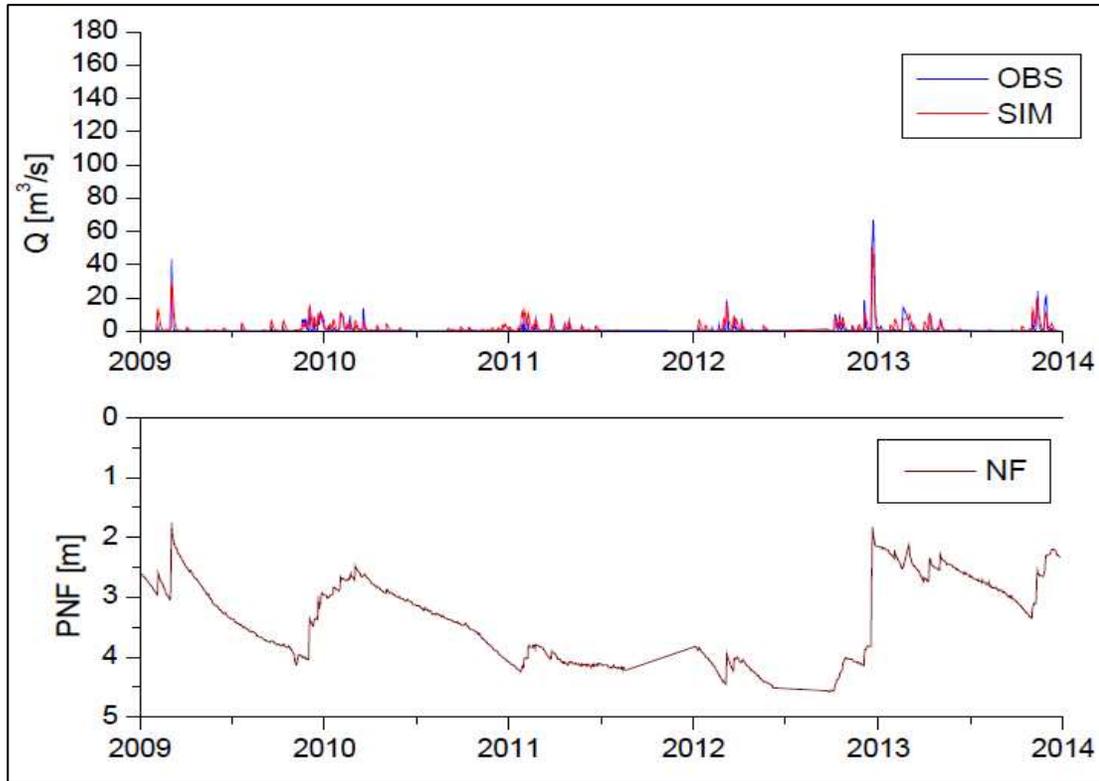


Figura 7. 13. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 2 periodo normal.

Por otro lado, para la etapa 2 (periodo de validación 2014-2018) se consideró un *periodo húmedo* (profundidad del NF en cercanías a la superficie). Se obtuvo un buen ajuste en la calibración (Tabla 7.10 y Figura 7.13) pero un bajo ajuste en la validación (Tabla 7.11 y Figura 7.14), por lo cual se procedió con el escenario tres.

Tabla 7. 11. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 2 periodo húmedo.

Estadístico	SWAT
Periodo húmedo (2014-2018)	
NS	0.39
R ²	0.48
Pbias	23.3

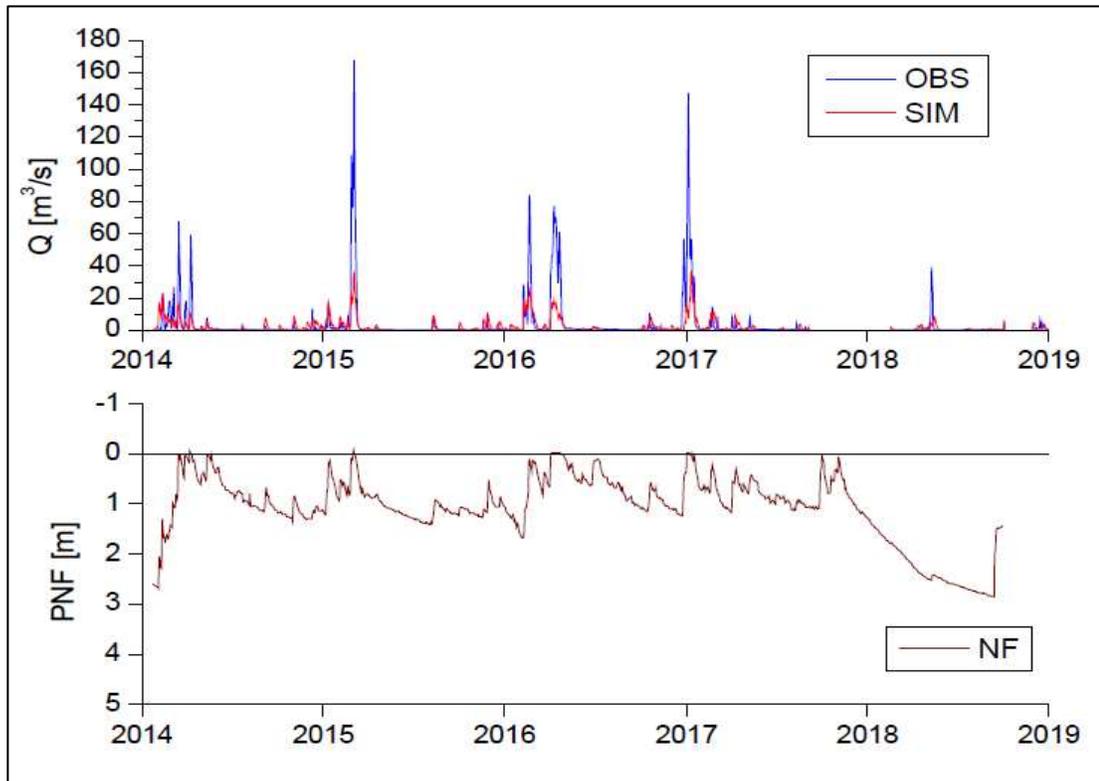


Figura 7. 14. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordo). Escenario 2 periodo húmedo.

En el tercer escenario para mejorar la respuesta de la cuenca en la etapa de validación se optó por utilizar una técnica de modelación con el fin de disminuir la incertidumbre del cálculo de la respuesta subterránea del SWAT, ya que se considera como un factor limitante por su programación original que impide la representación de las VSA's. Razón por la cual no había sido posible representar correctamente la respuesta de la cuenca en los escenarios previos. Por lo anterior, combinando los mapas de usos de usos del suelo de siguiente manera: periodo de calibración (mapa 1: periodo normal), periodo de validación (mapa 2: periodo húmedo) y contemplando los mismos parámetros y resultados obtenidos en la calibración de acuerdo al mapa 1 resultó un mejor ajuste en el periodo de validación con una respuesta aceptable de la cuenca A° las prusianas para los años 2014 al 2018 como se puede observar en la Tabla 7.12 y Figura7.15.

Tabla 7. 12. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 3 periodo húmedo.

Estadístico	SWAT
Periodo húmedo (2014-2018)	
NS	0.48
R ²	0.50
Pbias	15.9

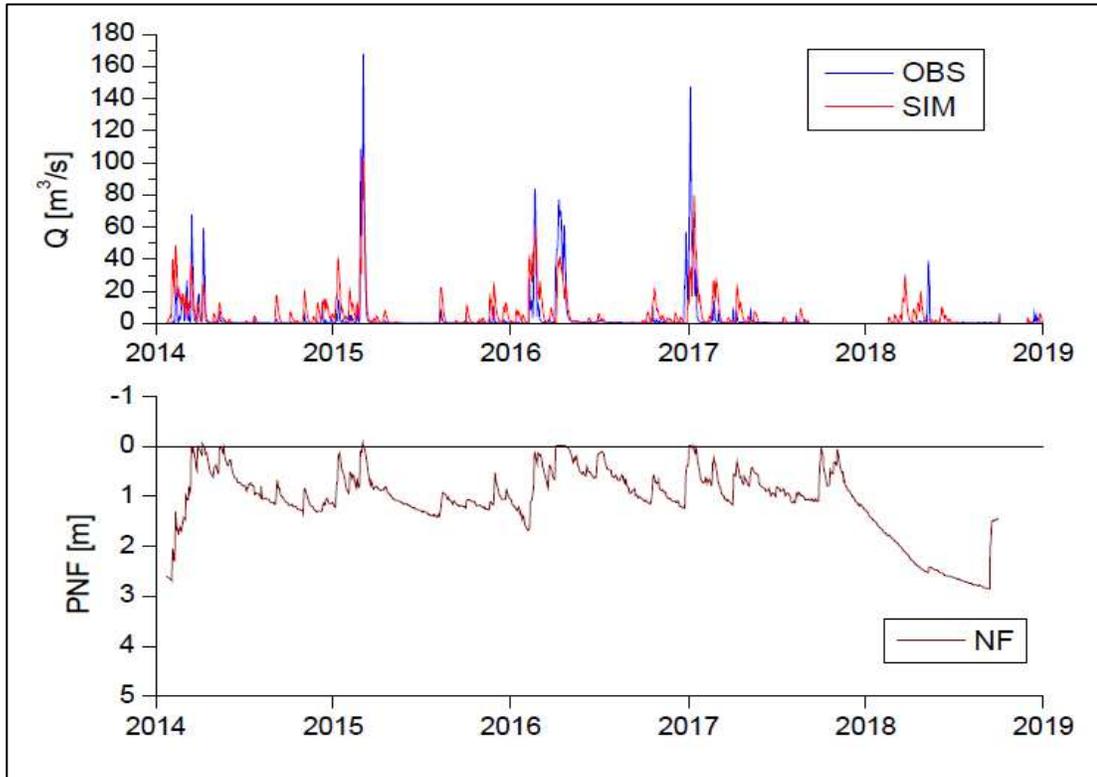


Figura 7. 15. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordo). Escenario 3 periodo húmedo.

Como se puede observar, se obtuvo una notoria mejora en la representación de los caudales picos y se incrementó en 9 unidades porcentuales la eficiencia de NS versus la obtenida en el escenario 2; para este caso fue de 0.48, el R² obtenido fue de 0.5 y el pbias indicó subestimación del 15.9. Sumado a ello, debido a estas incorporaciones el modelo SWAT arrojó resultados aceptables porque se logró mejorar la conexión entre el sistema superficial y subterráneo que es tan dinámico en una zona de llanura.

Lo que quiere decir que la combinación de los mapas 1 y 2 de usos del suelo influyeron para que el modelo SWAT funcionara de una manera adecuada teniendo en cuenta parámetros de calibración con coherencia física. Como se observa en la Tabla 7.13 y Figura 7.16 en donde la eficiencia al contemplar el periodo completo con las asunciones previas fue de 0.55, el R^2 de 0.56 y un pbias de -24.1. El pbias indicó una sobreestimación del modelo porque a pesar que se mejoró el ajuste para los caudales picos, caudales observados bajos <10 [m³/s] fueron sobreestimados. Cabe aclarar que estos caudales base si ajustaron en el escenario anterior.

Tabla 7. 13. Estadísticos entre los caudales diarios observados versus los calculados con el SWAT escenario de simulación 3 periodo húmedo.

Estadístico	SWAT
Periodo completo final (2009-2018)	
NS	0.55
R ²	0.56
Pbias	-24.1

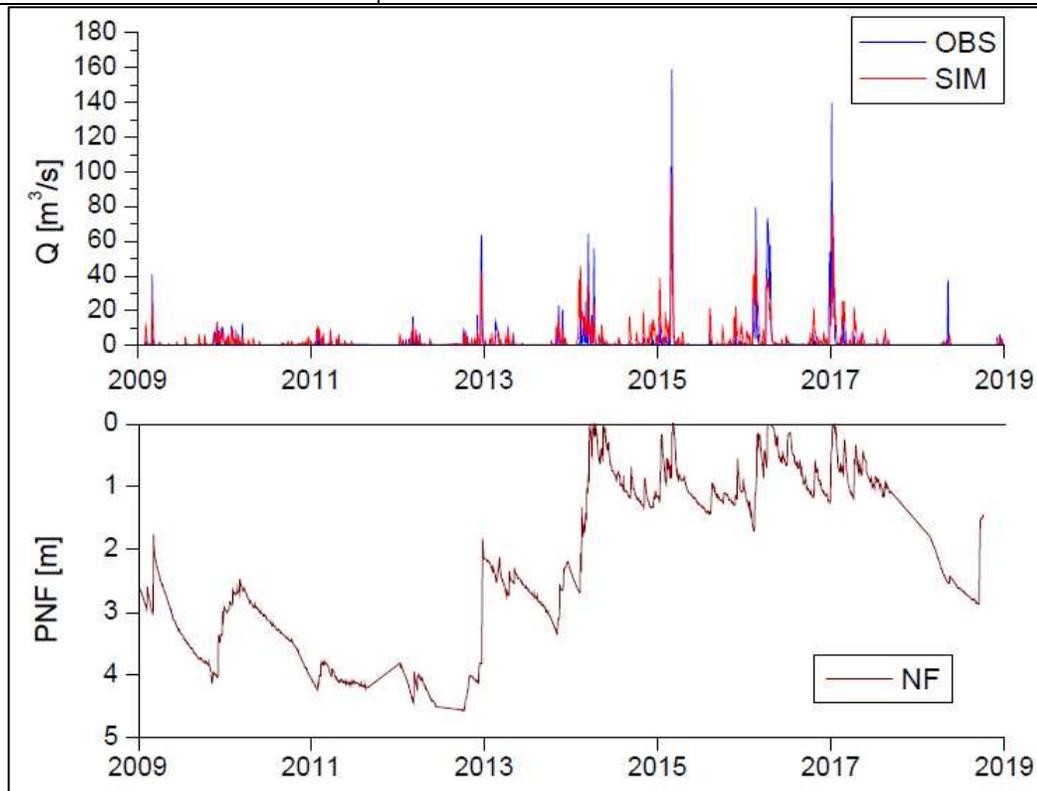


Figura 7. 16. Comparación entre el hidrograma observado (azul) Vs. el calculado con el modelo SWAT (rojo). Niveles freáticos (bordó). Escenario 3.

Por lo anterior, a partir de este momento se lograron condiciones aceptables para evaluar los resultados del balance hídrico.

7.3.4 Balance hídrico

Para demostrar que es vital contemplar el proceso de VSA's en la simulación continua porque el error que se tuvo al modelar el periodo completo inicialmente fue evidente. Se presentan a continuación los resultados del balance hídrico inicial para el periodo completo (escenario 1) versus el balance hídrico final para el periodo completo (escenario 3).

Tabla 7. 14. Balances hídricos promedio anual.

Balance hídrico promedio anual				
Periodo simulado	PCP [mm]	ET [mm]	SURQ [mm]	RCH [mm]
Completo inicial con Mapa 1 (2009-2018)	1050	784 (74.7%)	85 (8.1%)	181 (17.2%)
Completo final con Mapas 1 y 2 (2009-2018)	1050	761.37 (72.5%)	155.32 (14.8%)	133.31 (12.7%)

La Tabla 7.14 expone el balance hídrico promedio anual del escenario 1 en donde los resultados no fueron satisfactorios porque no se contemplaron las VSA's. En este caso de los 1050 [mm] que precipitaron (PCP), evapotranspiraron (ET) 784 [mm] (74.7%), escurrieron (SURQ) 85 [mm] (8.1 %) y se recargaron (RCH) 181 [mm] (17.2%). Mientras que al tener en cuenta las VSA's, el balance hídrico promedio anual del escenario 3 se modificó significativamente y de los 1050 [mm] que precipitaron, evapotranspiraron 761.37 [mm] (72.5%), escurrieron 155.32 [mm] (14.8%) y se recargaron 133.31 [mm] (12.7%).

Las principales diferencias entre escenarios se determinaron en las componentes de escurrimiento (SURQ) y recarga (RCH) ya que aumentó 6.7% y disminuyó 4.5% respectivamente.

En la Figura 7.17 se presenta el balance hídrico para todo el periodo de simulación, se puede observar que hasta el año 2014 inclusive, el sistema presento altas tasas de recarga. Sin embargo, a partir del 2015 por efecto de las VSA's, las tasas de escurrimiento aumentaron hasta un pico presentado en 2016. Posteriormente fueron disminuyendo por las bajas tasas de precipitación del año 2018 que también tuvo impacto en la profundización del NF llegando a estar aproximadamente en 3 [m] de profundidad.

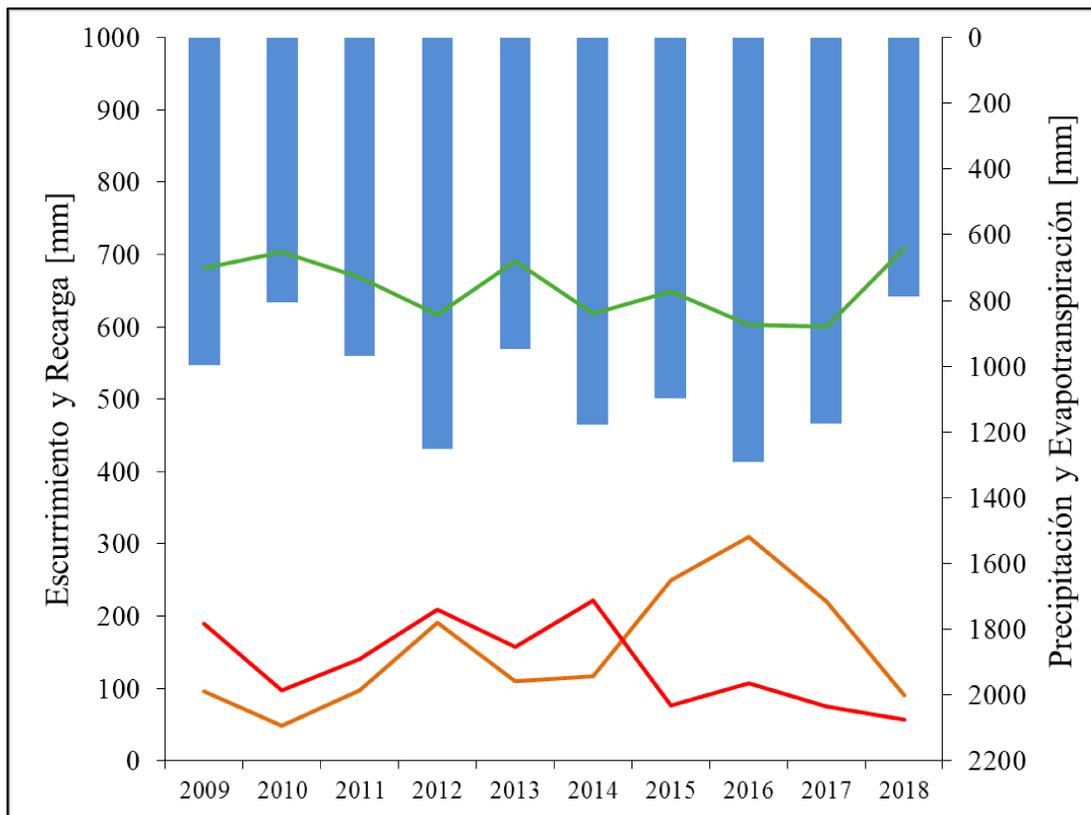


Figura 7. 17. Balance hídrico promedio anual cuenca Arroyo las Prusianas para el periodo 2009-2018. Precipitación (azul), evapotranspiración (verde), recarga (rojo) y escurrimiento superficial (naranja).

El balance de agua calculado también evidenció que los procesos además de ser influenciados por el movimiento vertical de agua (evapotranspiración y recarga), a partir del año 2014 preponderó la componente horizontal (escurrimiento superficial)

debido a la aparición del fenómeno de VSA's. Se puede observar que en el año 2014 se presentó la mayor tasa de recarga. Esta modificación del estado de saturación de la cuenca ocasionó que durante los años 2015 a 2017 aumentara fuertemente la escorrentía.

En los años 2012, 2015, 2016 y 2017 se presentaron excedentes hídricos donde se produjeron grandes inundaciones durante los meses de diciembre (2012) febrero (2015 y 2017), marzo (2015) y abril (2016).

En el 2012 de los 1250 [mm] que precipitaron, 191.54 [mm] escurrieron superficialmente (15.3%) y la cuenca se recargó con 209.38 [mm] correspondientes al 16.7% del total anual. Para los años 2015 a 2017 el balance hídrico calculado fue el siguiente. En el año 2015 la precipitación anual fue de 1099 [mm], de los cuales escurrieron 249.5 [mm] (22.7%) y la recarga fue de 76.61 [mm] (7%). Para el año 2016, de los 1292 [mm] que precipitaron, escurrieron 309.32 [mm] (23.9%) y se recargaron 107.83 [mm] (8.3%). En el año 2017 la precipitación fue de 1176 [mm], de los cuales escurrieron 220.35 [mm] (18.7%) y se recargaron al sistema acuífero 74.76 [mm] (6.3%).

Por el contrario, los años 2010 y 2018 tuvieron pluviometrías relativamente bajas. En el año 2010 ocurrió un ciclo seco con muy bajo almacenamiento de agua en el perfil del suelo debido a la alta evapotranspiración y al déficit pluviométrico. De la precipitación anual de 805 [mm], se evapotranspiraron 652.75 [mm], alrededor del 81% del total precipitado.

Para el 2018, la evapotranspiración fue de aproximadamente del 82% pero en ese año hubo la menor tasa de recarga en todo el periodo simulado (inferior al 8%). Finalmente, se presenta el balance de agua obtenido a escala mensual en el escenario

3 para el periodo completo (Figura 7.18). En donde en los meses de mayo a septiembre el agua que precipitó se evapotranspiró en su totalidad; por lo cual, se concluyó que esos meses son proclives a sufrir déficit hídrico en la cuenca Arroyo las Prusianas. Sin embargo, durante ese periodo de tiempo el sistema acuífero se intenta recuperar. Por otro lado, se determinó que en los meses de diciembre hasta abril la cuenca es susceptible a sufrir inundaciones a consecuencia de las altas tasas de recarga y escurrimiento.

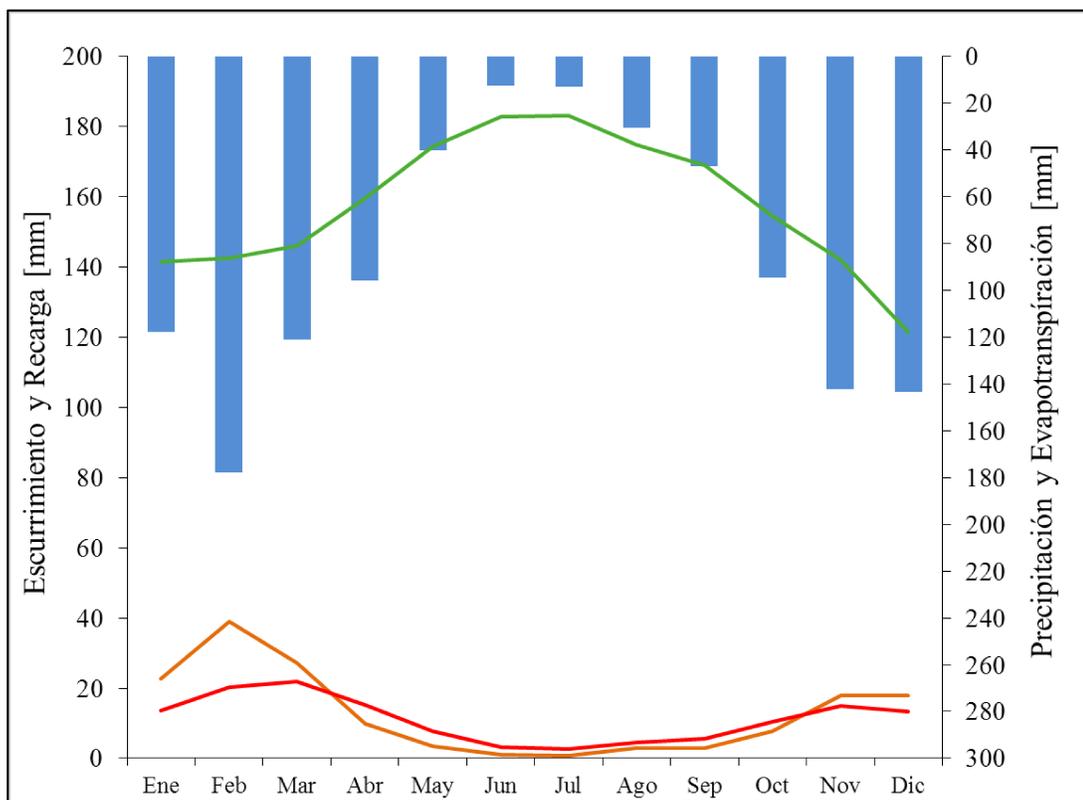


Figura 7. 18. Balance hídrico promedio mensual cuenca Arroyo las Prusianas para el periodo 2009-2018. Precipitación (azul), evapotranspiración (verde), recarga (rojo) y escurrimiento superficial (naranja).

Capítulo 8

Conclusiones, recomendaciones y líneas futuras de investigación

8.1 Conclusiones

La información recopilada permitió representar las características de la cuenca y brindó una escala de trabajo adecuada para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis, las conclusiones más relevantes se describen a continuación.

Se determinó la mejor base topográfica que fue utilizada en la modelación hidrológica semi-distribuida. El MDE SRTM 30 [m] con modificaciones representó de manera más adecuada la topografía y los procesos de dirección y acumulación de flujo de agua, los cuales influyeron en la delimitación de la cuenca, subcuencas y la red de drenaje del A° las Prusianas a diferencia de los resultados obtenidos a partir de los MDE's ALOS PALSAR E IGN.

El bi-plot de la banda de infrarrojo de onda corta (SWIR) versus el Índice de Humedad Diferencial Normalizado (NDWI) resultó adecuado para identificar y mapear adecuadamente zonas con alto contenido de humedad que se corresponden en gran medida con VSA's para diversos estados de saturación de cuenca. El ploteo de ambas bandas separó agua libre y superficies saturadas de la vegetación sana y coberturas secas. A medida que el valor de la reflectancia en la banda SWIR disminuyó, la densidad de la vegetación aumentó y a su vez fue mayor el contenido de humedad.

La aplicación del modelo SWAT a escala diaria arrojó resultados aceptables teniendo en cuenta el ajuste entre los caudales observados versus los simulados

evaluados en el cierre de cuenca. Contemplando un lapso de 14 años (2005 – 2018), se calibro el modelo para un periodo de 5 años (2009 – 2013) en donde el ajuste obtenido según el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NS) fue de 0.69, el R^2 de 0.7 y el pbias de 4.9%. Mientras que para el periodo de validación (2014 – 2018), cambiando el mapa de usos del suelo y conservando los parámetros calibrados, el NS obtenido fue de 0.48 con R^2 de 0.50.

Sin embargo, para el periodo completo inicial contemplado en el escenario 1 no fue posible ajustar el modelo SWAT debido a la alta no linealidad entre el proceso de precipitación neta y la esorrentía característico de las VSA's.

En el escenario 2, para el periodo normal en donde no se presentaron VSA's (2009-2013), el SWAT permitió modelar adecuadamente los procesos hidrológicos en la cuenca A° las Prusianas ya que se obtuvo un buen ajuste a escala diaria entre los caudales observados versus simulados en la salida de la cuenca (NS=0.69 R^2 = 0.7 y pbias= 4.9%). Pero para el caso del periodo húmedo usando el mapa 1 y manteniendo los parámetros de calibración, no fueron satisfactorios los resultados.

Por el contrario, en este trabajo se demostró con el escenario 3 que cambiando el mapa de usos del suelo para el periodo húmedo en función de la presencia de VSA's (Mapa 2); se obtuvo una mejora significativa en la reproducción del escurrimiento superficial para excesos hídricos (incremento del NS en un 9%).

Si bien el modelo no puede simular las VSA's, se concluye que en función del mapa de usos del suelo se puede contemplar este fenómeno tan importante en una zona de llanura.

Se concluye que cuando aparece el fenómeno de VSA's, se modifica notablemente el balance hídrico conseguido inicialmente para todo el periodo usando

el mapa 1: ET: 74.7%, SURQ: 8.1%, RCH: 17.2%, mientras que para el periodo completo con las consideraciones finales y con la combinación de los mapas 1 y 2 de usos del suelo, el BH resultó de la siguiente manera: ET: 72.5%, SURQ: 14.8% y RCH: 12.7%.

Por lo tanto, *para disminuir la incertidumbre en el modelado hidrológico continuo es vital contemplar las VSA's en pro de una gestión adecuada de los recursos hídricos en zonas de llanura ya que este fenómeno afecta drásticamente la predicción de inundaciones, sedimentos, fuentes difusas de contaminación, entre otras...* A pesar de que se logró identificar las VSA's y se implementó el modelo SWAT con resultados aceptables por el buen ajuste de los caudales superficiales a partir de la contemplación de diversas técnicas de modelación; no fue posible representar el fenómeno de VSA's que domina la escorrentía superficial en periodos húmedos y con ello, la respuesta hidrológica de la cuenca Arroyo las Prusianas. A este respecto, en esta tesis se demostró que cambiando el mapa de usos del suelo se mejora la reproducción de los caudales (especialmente para excesos hídricos).

Se concluye que al incluir un periodo húmedo dentro de la calibración, el fenómeno de VSA's se incorpora dentro del ajuste y se incurre en el error de no contemplar los parámetros físicos del suelo porque intrínsecamente se induce a que el fenómeno está inmerso en la calibración; enmascarando el proceso de generación de escorrentía por mecanismo de saturación (propio de las VSA's).

Utilizando el SWAT en su configuración original no fue posible implementar una modelación hidrológica *continúa* en una zona de llanura donde es importante el fenómeno de generación de escorrentía por saturación de flujo, porque el modelo hidrológico SWAT no logra simular correctamente la variación del NF ni el flujo de

agua subterránea, debido a que no tiene en cuenta: el espesor del acuífero, la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento ni la permeabilidad de lecho del Arroyo. Además, los HRU's no tienen una continuidad espacial. Por lo anterior, el modelo SWAT genera alta incertidumbre en el cálculo del escurrimiento superficial especialmente para periodos húmedos cuando el NF se encuentra en proximidad a la superficie del terreno.

En consecuencia, el desafío de incorporar el proceso generador de escorrentía producido por las VSA's en el modelo SWAT radica en la modificación de los métodos de pérdidas y/o su acople con un modelo hidrogeológico. Estas consideraciones deberán permitir al programa la representación de la saturación del perfil de suelo en cada HRU. Con esto, el SWAT sumaría la capacidad de simular correctamente el comportamiento hidrológico en una zona de llanura.

Igualmente, con la aplicación del SWAT en la cuenca Arroyo las Prusianas se identificó que la información contenida en el mapa de usos del suelo fue más sensible a la localización del nivel freático que a factores como la rotación del cultivo. Lo que sugirió que la confección de este mapa en una zona de llanura gobernada por VSA's es más complejo que una rotación de cultivo convencional. Comúnmente esta rotación se define en base de las fases del desarrollo según la clase del cultivo. Pero en la llanura, el uso del suelo está fuertemente condicionado y en función del comportamiento del nivel freático.

8.2 Recomendaciones y líneas futuras de investigación

El mapeo de VSA's ha sido un limitante en diferentes estudios en zonas de llanura. Por lo anterior, se recomienda considerar la caracterización propuesta del triángulo resultante entre la banda del infrarrojo de onda corta y el NDWI.

Con esta técnica será posible mapear zonas con alto contenido de humedad con alta precisión por medio de exportar a un SIG los píxeles que se relacionan con ser VSA's.

Se recomienda mejorar la instrumentación en la cuenca con nueva información hidrometeorológica para determinar de una manera más adecuada la variación espacio-temporal del balance hídrico en la cuenca A° las Prusianas.

Concordando con Her, et al. (2015), se recomienda cuantificar la pérdida de información contenida en el mapa de HRU's generado a partir de la sensibilidad que le otorga la selección de los umbrales en el SWAT. Esta mejora permitirá reducir la incertidumbre de la representación física del sistema.

En la cuenca Arroyo las Prusianas existen sectores que son explotados actualmente con agricultura y ganadería; a pesar que los suelos poseen restricciones de uso severas que influyen en la productividad y dificultan el desarrollo. A este respecto, se recomienda evaluar los consumos de cada actividad productiva de la cuenca y su relación directa con la variación en el nivel freático. Esto conllevaría a un posible cambio del uso del suelo, por ejemplo: migración a un nuevo tipo de cultivo con condiciones de adaptabilidad mayores y planes de consumos previamente contemplados.

Por otro lado, la capacidad computacional requerida por el SWAT en el proceso de definición de los HRU's y su posterior importación de resultados; en algunos casos puede llegar a ser elevada debido al gran número de HRU's. En ese caso, se recomienda modelar la cuenca adoptando simplificaciones (p. ej. combinando series de suelos con características similares, reduciendo clases o sencillamente simulando periodos de tiempo más cortos).

En el presente trabajo se acudió a una máquina con recursos computacionales superiores a los de un PC promedio; para lograr importar estos resultados sin la necesidad de incurrir en simplificaciones del sistema físico.

En base al desarrollo de la presente tesis y los resultados obtenidos, se proponen algunas líneas futuras de investigación que pueden ser objeto de interés.

(i). Mejorar la cuantificación espacio-temporal de la generación de VSA's por medio de imágenes de radar a través de diferentes sensores (p. ej. SMAP, SMOS).

(ii). Implementar un modelo acoplado hidrológico "SW" - hidrogeológico "GW" para mejorar la representación del flujo de agua subterránea ya que los modelos hidrológicos clásicos no representan adecuadamente la variación del NF, la cual es fundamental para determinar el mecanismo de generación de escorrentía dominante en la cuenca.

(iii). Implementar en una zona de llanura una modelación continua con el SWAT en donde cambie automáticamente el uso del suelo en función de la saturación del perfil.

(iv). Evaluar la aplicación del modelo SWAT-VSA desarrollado por Easton, et al. (2008) ya que una de las supuestas fortalezas de esta herramienta es la de capturar la variación espacial de la escorrentía simulando las VSA's. Sin embargo, para esta nueva línea de investigación se identificó la necesidad de incluir el índice de similitud hidrológica (I_{SH}) propuesto por Scioli (2016) en vez del índice topográfico de humedad convencional (TWI) planteado por Beven y Kirkby (1979). El TWI permite representar el comportamiento de las VSA's en zonas con pendientes superiores al rango del 2%. Sin embargo, en la llanura Argentina existen pendientes inferiores.

Por lo que básicamente el TWI representaría la acumulación de flujo presente al pie de las laderas. En cambio, en áreas con pendientes por debajo del rango del 2%, no representaría adecuadamente el relieve, perdiendo su significado físico. En estos sectores de pendientes bajas, el índice adopta valores altos, independientemente del tamaño del área drenada. Esto conlleva a identificar zonas con alta probabilidad de saturación. Aunque las mismas se encuentren en sectores difícilmente anegables como lo plantea Scioli (2016).

(v). Programar el SWAT para que combine un índice topográfico que indique la variación espacial con el mapa de los tipos del suelo y modificar el método de pérdidas (p. ej. número de curva). De esta manera se podrá llegar a relacionar la correcta actualización de la condición de humedad antecedente (saturación del perfil del suelo) incluyendo en la programación un nuevo almacenamiento/reservorio que simule la zona no saturada.

Referencias Bibliográficas

- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., Van Genuchten, M. T., (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), pp 1340-1352. Doi:10.2136 / vzt2004.1340.
- Abbaspour. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis program (2007). Eawag: Swis Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Dübendorf, Switzerland, pp.1-93.
- Abbaspour, K. C., E. Rouholahnejad., S.Vaghefi., R.Srinivasan., H.Yang., B.Kløve., A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. (2015). *Journal of Hydrology*, Volume 524. 04437 PAV Pavillon EAWAG Dübendor. pp. 733 – 752.
- Ågren, M.; Lidberg, W.; Strömgren, M.; Ogilvie J. and Arp, P. A (2014). Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study. *Hydrology Earth System Science* 18, pp 3623–3634.
- Ahmad y Quegan. (2012). Analysis of Maximum Likelihood classification technique on Landsat 5 TM satellite data of tropical land covers. *Applied Mathematical Sciences*, pp 6425 - 6436.
- Ali, G.; Birkel, C.; Tetzlaff, D.; Soulsby, C.; McDonnell, J. J. and Tarolli, P. (2014). A comparison of wetness indices for the prediction of observed connected saturated areas under contrasting conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: pp 399–413.

- Amoozegar. (1992). Compact constant head permeameter: a convenient device for measuring hydraulic conductivity. G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green (eds.). *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA., pp. 31–42.
- Arnold y Allen. (1999). Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records. *J. American Water Resour. Assoc.*, 35(2): pp 411-424. .
- Arnold y Eckhardt. (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251(1-2): pp 103-109.
- Arnold y Fohrer. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological processes*, 19(3): pp 563-572.
- Arnold y Di Luzio. (2004). Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input. *Journal of Hydrology*, 298(1-4): pp 136-154.
- Aquaveo. (2019). WMS 11.0. SMS User Manual. The Surface Water Modeling System. pp 20. Disponible en <https://www.aquaveo.com/software/wms-watershed-modeling-system-introduction>
- Badano. (2010). *Modelación Integrada de Grandes Cuencas de Llanura con Énfasis en la Evaluación de Inundaciones*. Tesis de grado en Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería UBA. pp. 45–56.
- Behera y Panda. (2006). Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a subhumid subtropical region using a physical process-based model. *Agric. Ecosystems Environ*, 113(1-4): pp 62-72.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Behrends, F; Vazquez, A; Chagas, I; Palacín, E; Santanatoglia, O; Castiglioni, M; Massobrio, M. (2011). Aplicación del modelo hidrológico-swat-en una microcuenca agrícola de La Pampa ondulada. *Ciencias del Suelo*, pp 75-82.
- Bernstein, S; Xuemin, J; Gregor, B; Golden, A; Steven, M. (2012). Quick atmospheric correction code: Algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering*, 51, pp 1719-1723.
- Betson. (1964). What Is Watershed Runoff? *Journal of Geophysical Research*, 68: pp 1541-1552. <https://doi.org/10.1029/JZ069i008p01541>
- Beven y Freer. (2001). A dynamic TopModel. Issue10, Special Issue: Hydrology and Biogeochemistry of Forested Catchments. Volume15, pp 1993-2011. <https://doi.org/10.1002/hyp.252>
- Beven y Kirby. (1979). A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24: pp 43–69.
- Blumenfeld. (2015). An Unrestricted View: PALSAR Data at NASA's Alaska Satellite Facility (ASF) Distributed Active Archive Center (DAAC) Are Now Easier to Access. <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/unrestricted-palsar-asf-daac>
- Bosch, D. D., J. M. Sheridan, H. L. Batten, and J. G. Arnold. (2004). Evaluation of the SWAT model on a coastal plain agricultural watershed. *Trans. ASAE*, pp 1493-1506.
- Bradbury, Kenneth R.; Dripps, Weston; Hankley, Chip; Anderson, Mary P.; Potter, Kenneth W. (2000). Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates. University of Wisconsin, USA, pp 84.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brandizi, L; Fernández, S; Sequeira, M. (2014). Verificación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca alta del río Sauce . 2° Encuentro de investigadores en formación en recursos hídricos, IFRH , pp 64.
- Burgués, M; Romagnolia, M; Portapilaa, M; Rigallib, A; Maydana G, García, C. (2014). Análisis de sensibilidad de parámetros de calibración de SWAT vinculados al uso de fertilizantes en la sub-cuenca del Arroyo Cañada de Gómez, Santa Fe. 2° Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, FICH, UNL. Santa Fe, Argentina. 23-26 de septiembre.
- Caamaño Nelli G, Fertoni, Prendes, Quinodoz. (1979). Analysis of Non Typical Hydrological Systems. Theoretical Bases and Methodology Criteria. Departamento de Hidrología General y Aplicada. Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas. UNL. Santa Fe., pp 320.
- Ceccato P.; Flasse S.; Tarantola S.; Jacquemoud S. and Gregoire J. M., (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing Environment, pp 22–33.
- Chaubey, I., Chiang, L., Gitau, M. W., & Sayeed, M. (2010). Effectiveness of BMPs in improving water quality in a pasture dominated watershed. J. Soil Water Cons, 65(6), pp 424-437. <http://dx.doi.org/10.2489/jswc.65.6.424>
- Chiang, L., Chaubey, I., Gitau, M. W., & Arnold, J. G. (2010). Differentiating impacts of land use changes from pasture management in a CEAP watershed using SWAT model. Trans. ASABE, 53 (5), pp 1569-1584. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.34901>
- CIAF. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. Landsat Data Continuity Mission, Versión 1.0. Grupo Interno de Trabajo en

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- Collins, J; Paoli, C; Bianchi, H; Sosa D; Venencio, M. (2012). Plan director de los recursos hídricos de la Provincia de Santa Fe, pp 357.
- Cressie. (1993). Statistics for spatial data. Rev.Ed. Wiley Series in probability and Mathematical Statistics, pp 900. ISBN: 9781119114611.
- De Alwis, D. A.; Easton, Z. M.; Dahlke, H. E.; Philpot, W. D. y Steenhuis, T. (2007). Unsupervised classification of saturated areas using a time series of remotely sensed images. *Hydrology Earth System Science*, 11, pp 1609–1620.
- Downer y Ogden. (2004). GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. *Journal of Hydrologic Engineering*, pp 161–174.
- Dunne y Leopold. (1978). *Water in Environmental Planning*. W.H Freeman: New York, pp 818. ISBN: 978-0716700791.
- Easton, Z. M., Fuka, D. R., Walter, M. T., Cowan, D. M., Schneiderman, E. M., Steenhuis, T. (2008). Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. *Journal of Hydrology*, 348, pp 279– 291.
- El-Nasr, Ahmed Abu; Arnold, Jeffrey G.; Feyen, Jan; Berlamont, Jean. (2005). Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrological Processes*, 19(3), pp 573-587.
- Engelen. (2000). MODULUS: A Spatial Modelling Tool for Integrated Environmental Decision-making. Final report, EU-DG12 (Contract ENV4-CT97-0685), Brussels.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Engman y Chauhan. (1995). Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51: pp 189-198.
[http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00074-W](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(94)00074-W)
- EPA. (2013). Watershed modeling to assess the sensitivity of streamflow, nutrient, and sediment loads to potential climate change and urban development in 20 U.S. watersheds (final report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-12/058F, 2013.
- Espindola, A; Godagnone, R; Havrylenko, S; de la Fuente, J. C; Mercuri, P. (2014). Generación de bases de datos de suelos para modelos hidrológicos a escalas regionales . 10 p. <https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje3/3.18.pdf>
- Essenfelder. (2016). SWAT Weather Database. 10.13140/RG.2.1.4329.1927.
<https://swat.tamu.edu/media/116061/swat-weatherdatabase-v01803.7z>
- FAO. (2019). El Agua y la Agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Cumbre Mundial Sobre la Alimentación.
<http://www.fao.org/WorldFoodSummit/sideevents/papers/Y6899S.htm>
- FAO. (2019). Perspectivas por sectores principales; producción de cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
<http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s08.htm>
- Feldman. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, HEC, Davis, CA, 95616-4687 USA.
- Feler, M; Vazquez, G; Howard van meer, M; Gaspari, J; Mercuri, P; Prieto, D; Flamenco, E. (2014). Validación del modelo SWAT en la cuenca del río

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.
- Felicísimo. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales. pp 118. ISBN 84-7848-475-2.
- Fensholt y Sandholt. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid Environment. *Remote Sensing Environment* 87(1), pp 111–121.
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). El agua en las llanuras. UNESCO Regional Office for Science and Technology for Latin America and the Caribbean. Montevideo, Uruguay. ISBN: 92-9089-041-1. 59 p., illus.
- Gao. (1996). NDWI. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing Environment*, 58(3), pp 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University, pp 443. DOI: 10.13031/2013.23637.
- Gesch, D. B., Muller, J., Farr, T. G., (2006). The Shuttle Radar Topography Mission— Data Validation and Applications. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, pp 233-235.
- Giorgi, R; Tosolini, R; Sapino, V y León, C. (2010). Agrupamiento por aptitud agropecuaria de las tierras de la Provincia de Santa Fe (GAT) - II. Procedimientos operativos para la clasificación de las unidades cartográficas en clases y subclases de aptitud agropecuaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Golmohammadi, Golmar., Rudra, Ramesh., Dickinson, Trevor., Goel, Pradeep., Veliz, Mari., (2016). SWATDRAIN, a new model to simulate the hydrology of agricultural Lands, model development and evaluation. *Biosystems Engineering* , pp 31-47. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.11.003.
- Gomaríz, F; Toro, N; Cánovas, F; Alonso, F. (2013). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del Río Argos (Región de Murcia). *Boletín de la Asociación de Geógrafos de España*, pp 327-347 . DOI: 10.21138/bage.1828.
- Greenlee. (1987). Raster and Vector Processing for Scanned Linework. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10): pp 1383–1387.
- Guevara. (2019). Una metodología para el análisis de los patrones espacio temporales de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas en áreas de llanura bajo escenarios de cambio climático. Tesis doctoral presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, pp 194.
- Guevara Ochoa, C., Vives, L., Zimmermann, E., Masson I., Fajardo, L., Scioli, C. (2019). Analysis and Correction of Digital Elevation Models for Plain Areas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 85(3), pp 209–219.
- Guevara Ochoa, C; Cazenave, G; Vives, L; Vazquez, G. (2014). Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras. Aplicación en una cuenca rural, arroyo Santa Catalina, Prov. de Buenos Aires. II Congreso de Hidrología de Llanuras.

- Güntner, A.; Seibert, J. and Uhlenbrook, S. (2004). Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. *Water Resources Research*, pp 40. DOI: 10.1029/2003WR002864.
- Haas. (2010). Soil moisture modelling using TWI and satellite imagery in the Stockholm region. TRITAGIT EX 10-001 Royal Institute of Technology (KTH);100 44 Stockholm, Sweden.
- Han, E., Merwade, V., and Heathman, G. C. (2012). Implementation of surface soil moisture data assimilation with watershed-scale distributed hydrological model. *J. Hydrology* (24), pp 416-417. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.039>.
- Havrylenko, S; Bodoque, J; Srinivasan, R; Zucarelli, V; Mercuri, P. (2016). Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *CATENA*, pp 298-309.
- Her, Y; Chaubey, I; Frankenberger, J; Srinivasan, R. (2015). Threshold Effects in HRU Definition of the Soil and Water Assessment Tool. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 58(2):pp 367-378.
- Horton. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos (Transactions of the American Geophysical Union)*, 14: pp 44–460.
- Hunter. (2006). Flood Inundation Modelling. PhD Thesis, School of Geography, Bristol University, Bristol.
- Hurtado, J; Darwin, B; Yáñez, B. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (soil & water assessment tool) para analisis del caudal de escorrentía

- superficial en la cuenca hidrográfica del río las juntas. *GEOESPACIAL*, 12: pp 106 - 122.
- INTA. (2014). Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe 1:50.000. Visor GeoINTA. <http://www.geointa.inta.gob.ar/2014/05/22/mapa-de-suelos-de-la-provincia-de-santa-fe/>
- INTA. (2017). Los desafíos de la agricultura Argentina. Satisfacer las demandas y reducir el impacto ambiental. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Ediciones INTA.https://inta.gob.ar/sites/default/files/lib_desafiosagricultura_2017_online_b.pdf
- Jackson, T. J. (1993). Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrological Process*, 7, pp 139–152. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360070205>
- Kaufman, Y; Wald, A; Remer, L; Gao, B; Rong-Rong, L; Flynn, L. Channel—Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* , 35: pp 5. DOI: 10.1109/36.628795.
- Klute y Dirksen. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. *Methods of soil analysis, Part 1 Physical and mineralogical methods*, 2nd edition. Ed. Klute A. SSSA Publication N° 9. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA., pp.687-733.
- Kopecký y Čížková. (2010). Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? *Applied Vegetation Science*, 13: pp 450–459.
- Kröhling, y Brunetto. 2013a. Capítulo 26. Marco geológico y geomorfología de la cuenca del Arroyo Cululú. En: -Bases para el ordenamiento del territorio en el

- medio rural–Región Centro, Argentina. Parte 3-Territorio Santafesino. Editorial de la Universidad Nacional de Río Cuarto, pp 485–512.
- Krysanova, V., D.-I.Müller-Wohlfeil, and A. Becker. (1998). Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling*, 106(2-3): pp 261-289.
- Kumar y Lakshman. (2015). Identification of Hydrologically Active Areas in a Watershed using Satellite Data. *Aquatic Procedia* 4, pp 1339 - 1344.
- Kusre, B.C., Baruah, D.C., Bordoloi, P.K., Patra, S.C. (2010). Assesment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Appl. Energy*, 87, pp 298 - 309.
- Larson, K. M.; Small, E. E.; Gutmann, E. D.; Bilich, A. L.; Braun, J. J. y Zavorotny, V. U. (2008). Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*, 35, pp 1–5.
- Liersch. (2003). The Program pcpSTAT: user’s manual. Berlin, August 2003, pp 5.
- Luo y Zhang. (2009). Management oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed scale water quality modelling using SWAT. *Environmental pollution* , pp 157 - 163.
- McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist., (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17 a 22 de enero de 1993. American Meteorological Society, Boston, pp 179–184.
- ., (1995). Drought monitoring with multiple timescales. In: *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas, 15 a 20 de enero de 1995. American Meteorological Society, Boston, pp 233–236.

- Mallick, K; Bhattacharya, B; Patel, N. (2009). Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, pp 1327–1342. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.03.004.
- Maling. (1989). *Measurements from maps. Principles and methods of cartometry.* Pergamon Press. Oxford, pp 153-177.
- Mallants, D; Mohanty, B; Vervoort, A; Feyen, J. (1997). Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technologies*. 10: pp 115–131. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00093-1)
- Martz y Garbrecht. (1992). A comprehensive system for extracting channel network and subwatershed parameters from digital elevation models. Supplement to EOS, *Transactions of the American Geophysical Union*, 73(43) pp 1203.
- Moriasi, D; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W; Bingner, R. L; Harmel, R. D; Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp 885-900. <https://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodelevel.pdf>
- Mukherjee, S., P. K. Joshi, S. Mukherjee, A. Ghosh, R. D. Garg and A. Mukhopadhyay. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: pp 205–217.
- Narasimhan, B., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and M. Di Luzio. (2005). Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Trans. ASABE*, 48(3): pp 1101-1113.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Nash y Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2012). Soil and Water Assessment Tool. Input/output file documentations. Texas Water Resources Institute Report, Texas.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., King, K. W. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation. <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>
- NSPE. (2013). Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación “Argentina Innovadora 2020”. Segunda edición actualizada a abril de 2013. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Resumen ejecutivo pp40, disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sintesis_2013_ai.pdf
- Nuestro Agro. (2015). Inundaciones 2015: un impacto socioeconómico de magnitud. Nota publicada en Edición Impresa Nuestro Agro en marzo de 2015. <http://www.nuestroagro.com.ar/printedEditionNote.aspx?id=5796>
- NU. (2015). Naciones Unidas: Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2015: Agua para un mundo sostenible. 978-92-3-100080-5, pp 122. http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWD_R2015ExecutiveSummary_SPA_web.pdf
- OCDE. (2015). OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Olivera y Maidment. (1999). Developing a Hydrologic Model of the Guadalupe Basin. Center for Research in Water Resources, Austin, Texas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Oñate y Aguilar. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. 3^{er} Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográfica. Arequipa-Perú (8-13, junio). [http:// sig.utpl.edu.ec/sigutpl/Staftpro/hidrologia/swat_catamayo.pdf](http://sig.utpl.edu.ec/sigutpl/Staftpro/hidrologia/swat_catamayo.pdf)
- Ortíz. (2010). Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la cuenca del lago de Cuitzeo. México: Editoriales UNAM. https://www.ciga.unam.mx/images/posgrado/tesis/a_ortiz.pdf
- PNUD. (2006). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe sobre Desarrollo Humano. Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua. Mundi-Prensa Libros, s.a. Nueva York, EE.UU.: ISBN 10: 84-8476-301-3. http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2006_es_completo.pdf
- Prochnow, S.J., White, J.D., Scott, T., Filstrup, C.D. (2008). Multi-scenario simulation analysis in prioritizing management options for an impacted watershed system. *Ecohydrology Hydrobiology*, 8, 3e15.
- Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P. and Planchon, O. (2007). An adaptive approach to selecting a flow partition exponent for a multiple flow direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(4): pp 443-458.
- Quiñonero Rubio, J. M. y Alonso Sarría, F. (2007). Modelización de la dinámica hidrológica y erosiva en barrancos de la cuenca del río Quípar (sureste de España) con GRASS. *GeoFocus (Artículos)*, pp 188-215.
- Refsgaard, J. C. and Storm, B. (1995). MIKE SHE. In *Computer Models of Watershed Hydrology*: Singh, V.P., ed., Highlands Ranch, Colo. Water Resources Publications, pp 809-846.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Rodríguez, E; Morris, C; Belz, J; Chapin, E; Martin, J; Daffer, W; Hensley, S. (2005). An assessment of the SRTM topographic products. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California., pp 143.
- Rodriguez, E; Morris, C; Belz, J. (2006). A global assessment of the SRTM performance. Photogram. Remote Sensing in Engineering, pp 174 .
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.404.4045&rep=rep1&type=pdf>
- Rospriandana y Fujii . (2017). Assessment of small hydropower potential in the Ciwidey subwatershed Indonesia: a GIS and hydrological modeling approach. Japan. Hydrological Research Letters, 11(1), pp 6–11.
- Sala, J. M.; Kruse, E. y Aguglino, R. (1987). Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, pp 235.
- Sallies, A. (1999). Clima e Inundaciones en la Pampa Deprimida. Sacramento, California, U.S.A.: Floodplain Management Assosiation – 17th Semiannual Conference.
- Sapino, V. (2016). Inventario de las superficies afectadas por las inundaciones en el centro-sur de Santa Fe al 21 de abril de 2016. Disponible en:
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_rafaela_informe_anegamientos_21_abril_2016.pdf
- Sayde, C.; Gregory, C.; Gil-Rodriguez, M.; Tufillaro, N.; Tyler, S.; Van de Giesen, N. (2010). Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. Water Resource Research, pp 46.

- Schilling, K.E., Wolter, C.F. (2009). Modeling nitrate-nitrogen load reduction strategies for the Des Moines River, Iowa using SWAT. *J. Environ. Manage.*, pp 44.
- Schneiderman, E.; Steenhuis, T.; Thongs, D.; Easton, Z.; Zion, M.; Neal A, Mendoza, G. y Walter, T. (2007). Incorporating variable source area hydrology into Curve Number based watershed loading functions. *Hydrologic Processes* , 21. pp 3410 - 3430.
- Scioli. (2009). Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla, pp 160. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/4108>
- Scioli, C.; Rivas, R. y Villanueva A. (2007). Utilización del SRTM para fines hidrológicos en zonas de escaso relieve. XXI Congreso Nacional del Agua 2007. Tucuman, Argentina.
- Scioli C.; Pedraza, R.; Burgos, M.; Zimmermann, E. (2013). Identificación y Evaluación de Áreas Fuente Variables en Sistemas Hidrológicos de Llanura. XXIV Congreso Nacional del Agua, realizado por el Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua en La Ciudad de San Juan.
- Scioli y Villanueva. (2008). “Modelación Hidrológica de Grilla en Zonas de Llanura”. Workshop Internacional de Aplicaciones de SIG en Hidrología - Santa Fe, Argentina, 8 y 9 de Octubre de 2008.
- Scioli y Villanueva. (2011). Modelación Hidrológica de Grilla en Zonas de Llanura: Movimiento multidireccional del Agua. *Aqua Lac UNESCO*, pp 1-8.
- Scioli, C. (2016). Un nuevo índice de similitud hidrológica para la simulación precipitación - escorrentía en sistemas de llanura. Santa Fe, Argentina. Tesis

- doctoral de la Universidad Nacional del Litoral. pp 155.
<http://hdl.handle.net/11185/944>
- SEGEMAR. (2012). Sistema de información geográfica del servicio geológico minero argentino. <http://www.segemar.gov.ar/igrm/sig/>
- Sexton, A., Sadeghi, A., Zhang, X., Srinivasan, R., & Shirmohammadi, A. (2010). Using NEXRAD and rain gauge precipitation data for hydrologic calibration of SWAT in a northeastern watershed. *Trans. ASABE*, 53(5), pp 1501-1510. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.34900>.
- Sharma y Tiwari,. (2014). A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level. *Journal of Hydrology*, pp 1394–1404.
- Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L., Liu, R.M. (2009). A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the three Gorges reservoir area. *Ag Water Mgmt*, pp 96-105.
- Sobieraj, J. A., H. Elsenbeer, y G. Cameron. (2004). Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *Catena*, 55: pp 49–77.
- Sørensen, R.; Zinko, U. and Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, pp 101–112.
- Srinivasan, R; Zhang, X; Arnold, J. (2010). SWAT ungauged: Hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi River basin. *Trans. ASABE*, 53(5), pp 1533-1546. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.34903>.
- Srinivasan, R; Her, Y; Chaubey, I; Frankenberger, J. (2015). Threshold effects in HRU definition of the Soil and Water Assessment Tool, *Transactions of ASABE* 58(2): pp 367-378, doi: 10.13031/trans.58.10805

- Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L.O., Arnold, J.G. (2001). Impacts of climate change on Missouri River basin water yield. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, pp 37.
- Strahler, A. N y Strahler, A. H. (1989). *Geografía Física*. Editorial Omega. Barcelona, España. pp 636, ISBN10:8428208476
- Sun, L; Yang, L; Hao, L; Fang, D; Jin, K y Huang, X. (2017). Hydrological effects of vegetation cover degradation and environmental implications in a semiarid temperate steppe, China. *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 9(2), pp 1-20, February 2017.
- Swain y Davis . (1978). *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. N.Y. McGraw-Hill. Eds. New York: McGraw-Hill, 1978. 396 pp.
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A. (2011). Characteristics of ASTER GDEM version 2. *Proceedings Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp 3657–3660.
- Tarboton. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 pp 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tarboton. (2011). Watershed delineation using TauDEM. A tutorial for using TauDEM to delineate a single watershed. Utah State University, pp 16. <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM5DelineatingASingleWatershed.pdf>
- Tucci. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Río Grande del Sur. Editora da UFRGS ABRH. pp 669.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Tucker. (1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*, pp 23–32. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90096-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90096-6)
- UNESCO. (2014). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Programa Hidrológico Internacional, octava fase “*seguridad hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales, y mundiales*”. PHI-VIII 2014-2021. Comité Nacional del PHI y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). pp 56. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000218061_spa
- USDA-SCS. (1975). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Survey*. Agricultural Handbook N° 436. Washington D.C.
- Van de Griend, A. and Engman, E.T.; 1985. Partial area hydrology and remote sensing. *Journal of Hydrology* Volume 81, Issues 3-4, 15 November 1985, pp 211-251
- Villablanca. (2014). *Uso del modelo SWAT para estudiar los efectos de cambios de uso del suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile*. Tesis de ingeniería civil de la Universidad Austral de Chile. pp 20. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcir684u/doc/bmfcir684u.pdf>
- WB. (2019). *Reporte global del riesgo presentado por el Banco Mundial (WB)*. Global Risks Report, 14th Edition, World Economic Forum. pp 114. ISBN: 978-1-944835-15-6. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Weibel y Heller. (1991). Digital terrain modelling. Geographical Information Systems. Longman, Scientific & Technical, pp 269-297.
- Weinzettel. (2005). Hidrodinámica de la zona no saturada en suelos argiudoles de la cuenca del Arroyo Azul. Tesis doctoral en geología. Universidad Nacional del Sur, pp.185.
- WRG. (2013). Informe anual del 2030 Water Resources Group (WRG). Alianzas en aras de la seguridad hídrica para las personas, el crecimiento y el medioambiente. Carmen del Río, 2030 WRG. Washington, D.C. EE.UU.
<http://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2014/01/2030-WRG-Annual-Report-2013-Spanish.pdf>
- Xie, X. y Cui, Yuanlai. (2011). Development and test of SWAT for modelling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice (China). Journal of Hydrology, pp 61-71.
- Yamazaki, D.; Baugh, C.A.; Bates, P.D.; Kanae, S.; Alsdorf, D. E. and Oki, T. (2012). Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modelling. Journal of Hydrology, pp 81-91.
- Yang, J. P.; Ding, Y. J. and Chen, R. S. (2006). Spatial and temporal of variations of alpine vegetation cover in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers of the Tibetan Plateau from 1982 to 2001. Environmental Geology, 50(3), pp 313–322.
- Yang, J. P.; K.C. Abbaspour, P. Reichert, H. Yang. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. J. Hydrology., 358 (2008), pp 1-23.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Zárate y Kuiper. (2013). Water Footprint Assessment of Bananas Produced by Small Banana Producers in Peru and Ecuador. Good Stuff International – Switzerland, January 2013. pp 70. www.goodstuffinternational.com.
https://www.goodstuffinternational.com/images/PDF/Reporte%20GSI_HH_Bananas_pequenos_productores.pdf
- Zhang, M; Ficklin, D; Luo, Y; Luedeling, E. (2009). Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT model. *Journal of Hydrology*, pp 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.016>

Anexos

Anexo 1. Índice de Precipitación Normalizado SPI.

ANEXOS

El SPI (McKee., et al, 1993, 1995) es un potente y flexible índice que requiere únicamente información del parámetro precipitación para su cálculo. Se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal, es eficiente, adecuado y como está normalizado, es posible representar los períodos y ciclos húmedos como también los secos. Actualmente es utilizado en investigaciones o en modo operativo por diversos Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales en sistemas de alerta temprana en más de 70 países (incluida la Argentina). Muchos planificadores emplean el SPI y aprecian su versatilidad ya que posee menor complejidad que Índice de severidad de sequía de Palmer y que muchos otros índices.

Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor. Los episodios de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1,0 o inferior. El episodio finaliza cuando el SPI alcanza valores positivos. McKee., et al. (1993) establecieron los límites que se presentan en las Tablas A 1.1 y 1.2 en base al análisis de las series de precipitación de diversas estaciones meteorológicas de USA.

Tabla A 1. 1. Valores del índice SPI.

2.0 y más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
- 2.0 y menos	Extremadamente seco

Tabla A 1. 2. Clasificación del índice SPI periodo seco.

SPI	Categoría	Número de veces en 100 años	Severidad del episodio
0 a -0.99	Sequía leve	33	1 en 3 años
-1.0 a -1.49	Sequía moderada	10	1 en 10 años
-1.5 a -1.99	Sequía severa	5	1 en 20 años
- 2.0 y menos	Sequía extrema	2.5	1 en 50 años

ANEXOS

La Figura A 1.1 presenta los resultados del SPI para el episodio de sequía moderada (magnitud máxima -1.21) que tuvo lugar a finales del año 2014.

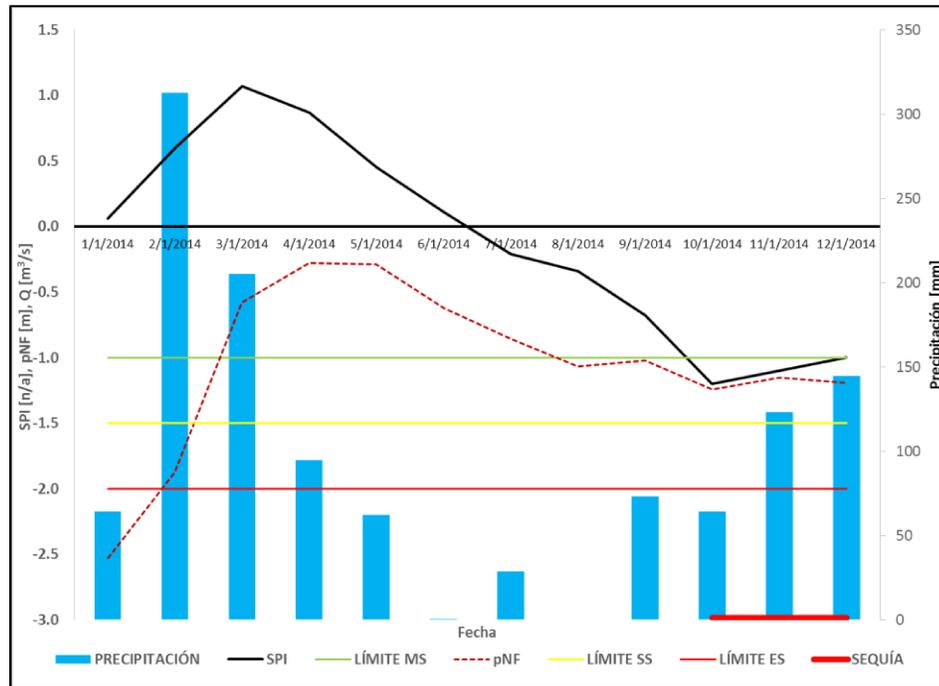


Figura A 1. 1. Episodio de sequía moderada finales del año 2014.

Por otro lado, en la Figura A 2.1 se presentan los episodios de excesos hídricos durante el año 2016 (magnitud máxima 1.32).

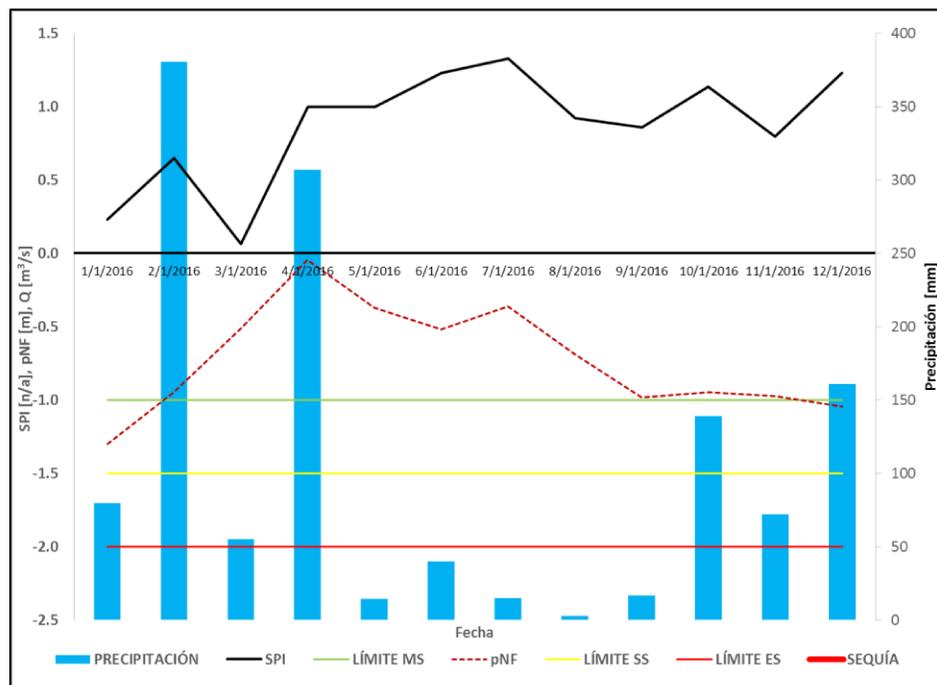


Figura A 1. 2. Episodios de excesos hídricos del año 2016.

**Anexo 2. Funcionamiento del Modelo hidrológico semidistribuido
continuo SWAT en su versión original.**

ANEXOS

El funcionamiento del SWAT está sintetizado en la Figura A 2.1 y parte de entender la unidad de respuesta hidrológica (HRU) como la mínima estructura primordial necesaria para computar los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico, cabe aclarar que cada HRU está sometido a un balance hídrico independiente.

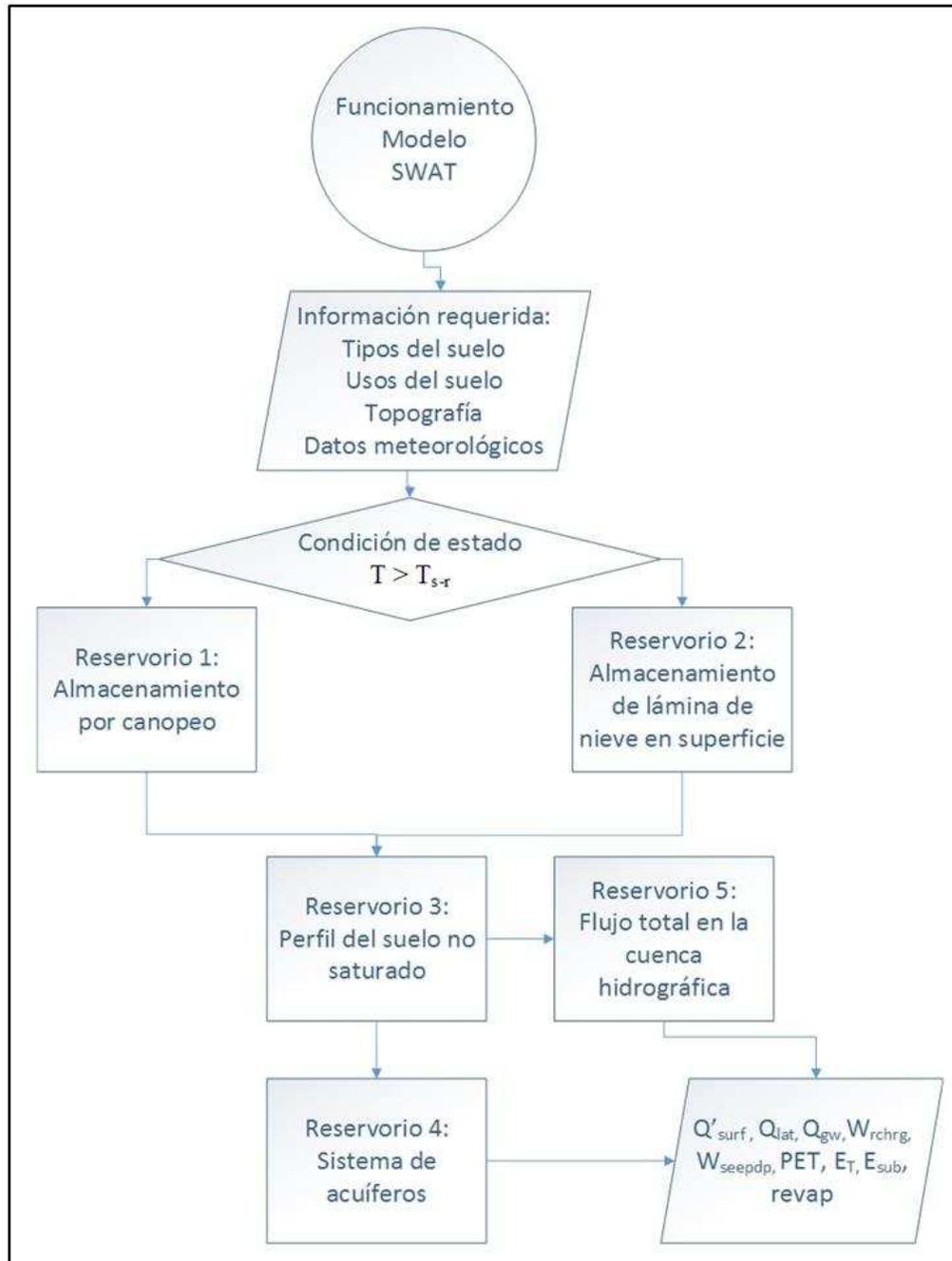


Figura A2 1. Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo SWAT.

La representación del balance de agua en el SWAT se ejecuta mediante 5 reservorios lineales. La entrada a los reservorios puede ser agua precipitada o nieve (en función de la temperatura). El primer reservorio representa la capa de la cobertura vegetal de la superficie terrestre. Tiene como función simular la retención del agua en la planta. La salida de este reservorio es la cantidad de agua que logra llegar a la primera capa de suelo. En este reservorio la precipitación captada (R') en forma de lluvia se somete a las características de la cobertura vegetal (CANMX) y por medio de la función almacenamiento por canopeo (CAN_{day}), se calcula la lluvia interceptada por el dosel de las plantas (R_{INT}). Además en este reservorio se determina la evapotranspiración potencial (PET) y la precipitación efectiva que alcanza la primera capa del suelo (R).

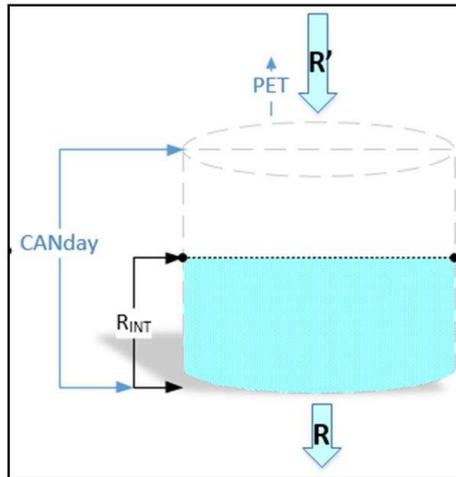


Figura A2 2. Reservorio 1 SWAT.

El reservorio 2 se activa en tal caso que la condición de estado " $T > T_{s-r}$ " no se cumpla porque existe la presencia de nieve (R'). En este caso, en el segundo reservorio se simula la lámina de nieve retenida por las plantas en superficie, la salida de este reservorio es el agua transferida a la primera capa de suelo por efectos del derretimiento de nieve. Se somete a las características del área con nieve (SNOCOVMX) y por medio de la función cobertura de nieve (SNO), se calcula la

sublimación de agua (E_{sub}) y la lámina de nieve presente sobre superficie. Como también, el agua producto del derretimiento de nieve hacia la primera capa del perfil del suelo (SNO_{melt}).

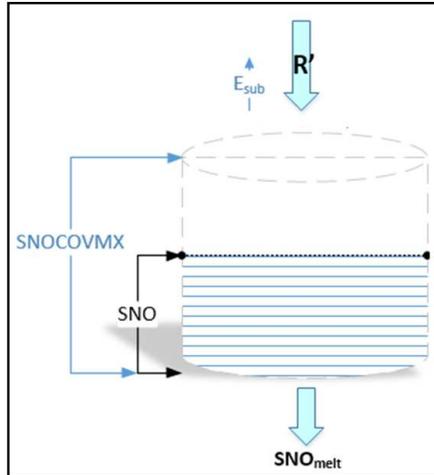


Figura A2 3. Reservoirio 2 SWAT.

El tercer reservorio recibe las salidas de los reservorios 1 y 2 para simular el escurrimiento superficial, sub-superficial y también la percolación de agua a capas más profundas del suelo. En el reservorio 3 la precipitación efectiva (R) en forma de lluvia o el derretimiento de nieve (SNO_{melt}) se somete a la función saturación del suelo (SAT) que tiene en cuenta el contenido de agua en exceso (SW_{excess}) y la humedad del suelo requerida por la planta en la etapa de crecimiento (FC) que a su vez contempla el contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez (WP) y la capacidad requerida del suelo para el desarrollo normal de la cobertura vegetal (AWC). Se calcula el agua que recarga el sistema de acuíferos (W_{rchrg}), al igual que la evapotranspiración real (E_T), la escorrentía superficial (Q'_{surf}) y el flujo sub-superficial (Q_{lat}).

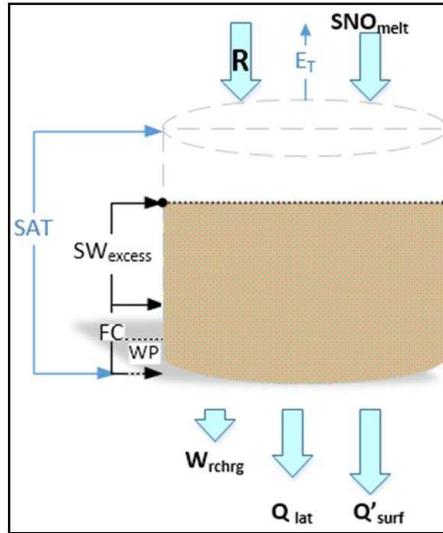


Figura A2 4. Reservorio 3 SWAT.

El SWAT simula el agua subterránea mediante un sistema compuesto por: un acuífero libre con espesor de 2-20 [m], que contribuye al cauce principal; y un acuífero confinado con espesor > 20 [m]; que descarga fuera de los límites de la cuenca. La entrada de agua al acuífero libre se da por infiltración/percolación, aunque una fracción asciende de nuevo por capilaridad. La recarga del acuífero confinado se da por percolación profunda. Las ecuaciones 2.1 y 2.2 gobiernan el balance de agua en el sistema de acuíferos.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg,sh} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{pump,sh} \quad (2.1)$$

Donde: $aq_{sh,i}$ [mm]: cantidad de agua almacenada en el acuífero libre (shallow) en el día i , $aq_{sh,i-1}$ [mm]: cantidad de agua almacenada en el acuífero libre en el día $i-1$, $W_{rchrg,sh}$ [mm]: cantidad de agua que recarga e ingresa al acuífero libre en el día i , Q_{gw} [mm]: flujo subterráneo o flujo base al canal principal en el día i , W_{revap} [mm]: cantidad de agua en movimiento que ingresa a la zona no saturada en respuesta al déficit de agua en el día i , y $W_{pump,sh}$ [mm]: cantidad de agua removida por bombeo en el día i .

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + W_{deep} - W_{pump,dp}. \quad (2.2)$$

Donde: $aq_{dp,i}$ [mm]: cantidad de agua almacenada en el acuífero confinado (deep) en el día i , $aq_{dp,i-1}$ [mm]: cantidad de agua almacenada en el acuífero confinado en el día $i-1$, W_{deep} [mm]: cantidad de agua que percola desde el acuífero libre en el día i , y $W_{pump,dp}$ [mm]: cantidad de agua removida por bombeo en el día i .

Finalmente se encuentra el reservorio 5, donde se simula la capacidad de retención ($Q_{storage}$) de la superficie, el flujo superficial, sub-superficial y subterráneo. La salida del ruteo brinda información del flujo total que se produce en la cuenca hidrográfica durante el tiempo de simulación declarado por el modelador con base en la respuesta del balance hídrico de cada HRU que compone la cuenca.

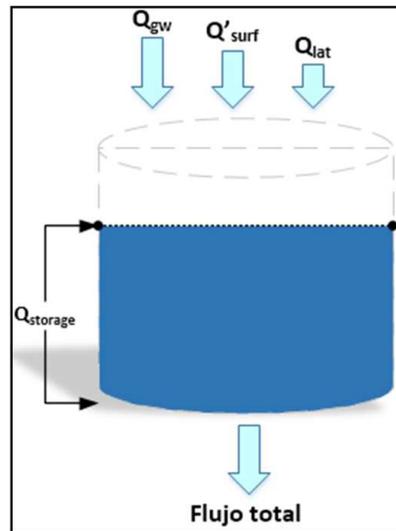


Figura A2 5. Reservorio 5 SWAT.

Anexo 3. Mapas de VSA's obtenidos a partir de sensores remotos.

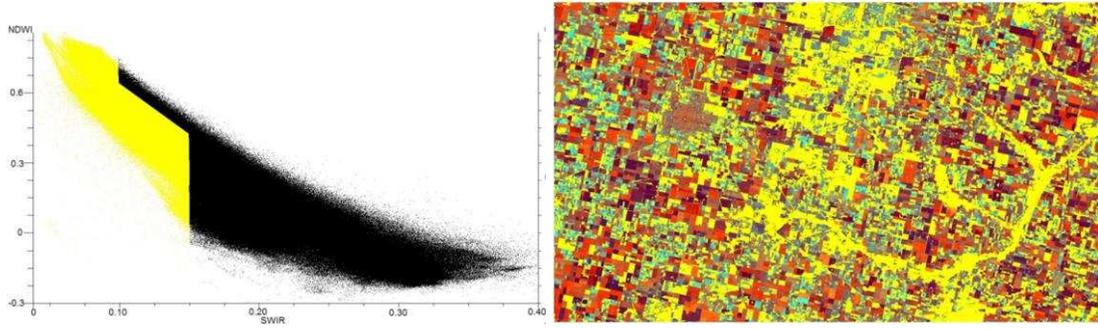


Figura A3 1. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 15 de noviembre de 2014

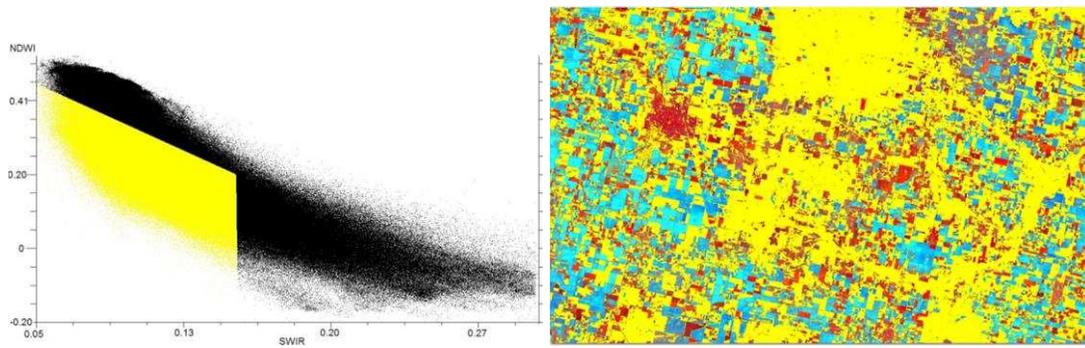


Figura A3 2. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 21 de enero de 2016

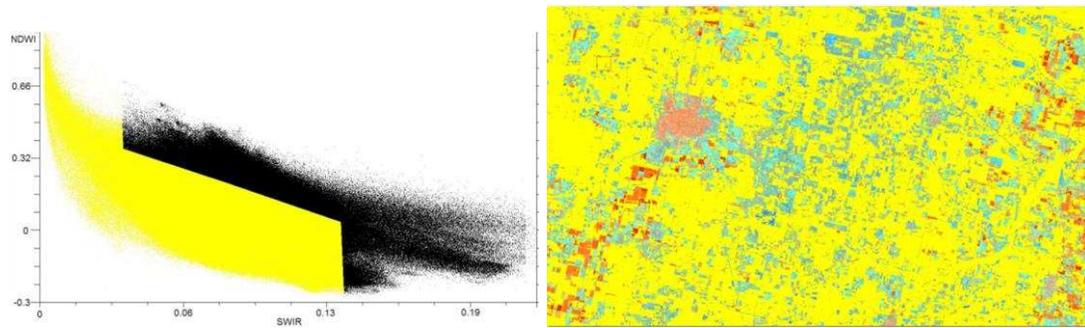


Figura A3 3. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 26 de abril de 2016

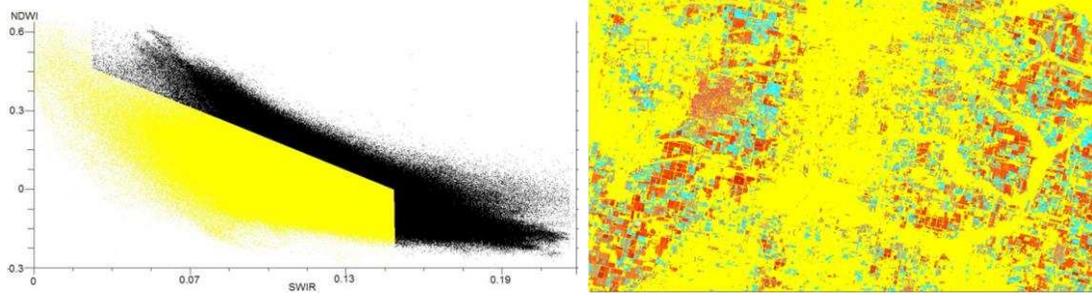


Figura A3 4. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 29 de junio de 2016

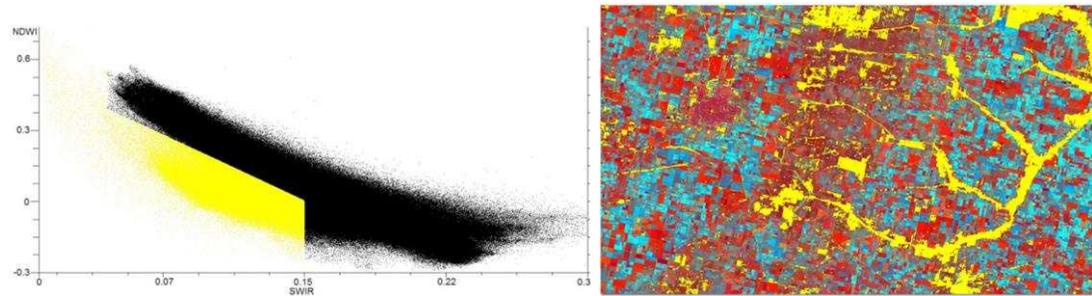


Figura A3 5. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 16 de agosto de 2016

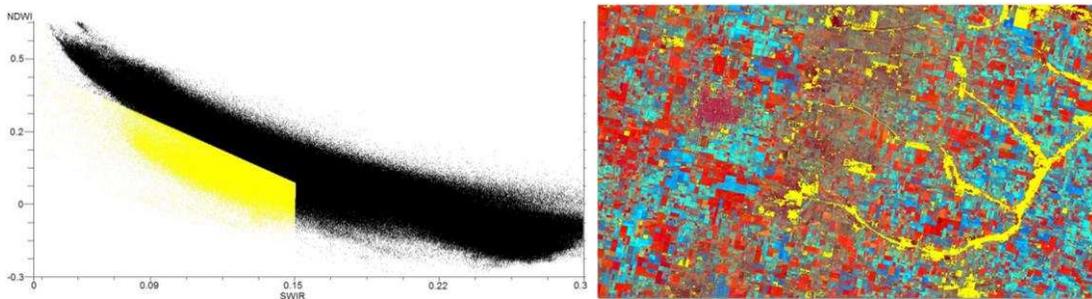


Figura A3 6. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 17 de septiembre de 2016

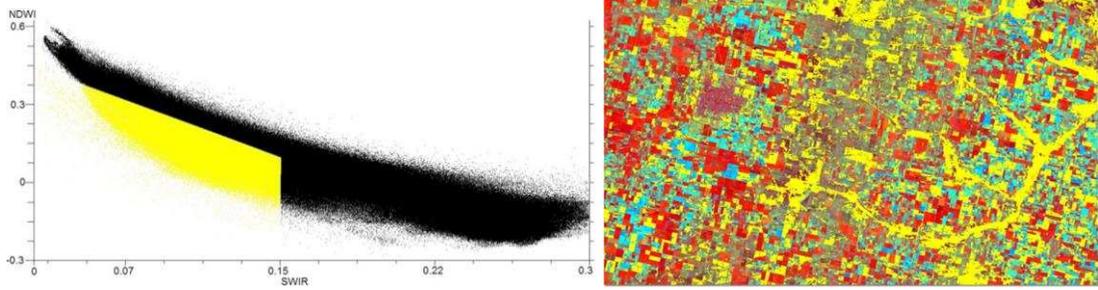


Figura A3 7. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 03 de octubre de 2016

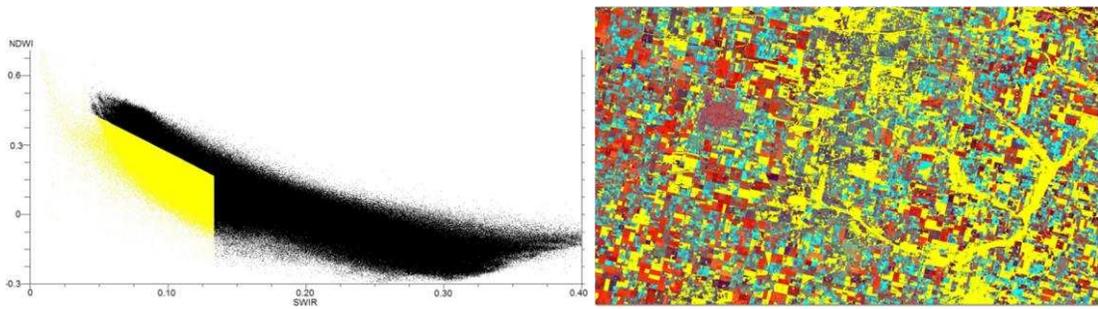


Figura A3 8. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 04 de noviembre de 2016

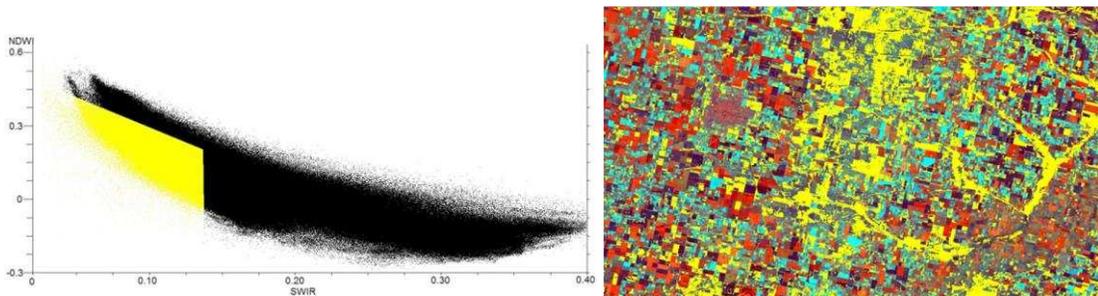


Figura A3 9. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 20 de noviembre de 2016

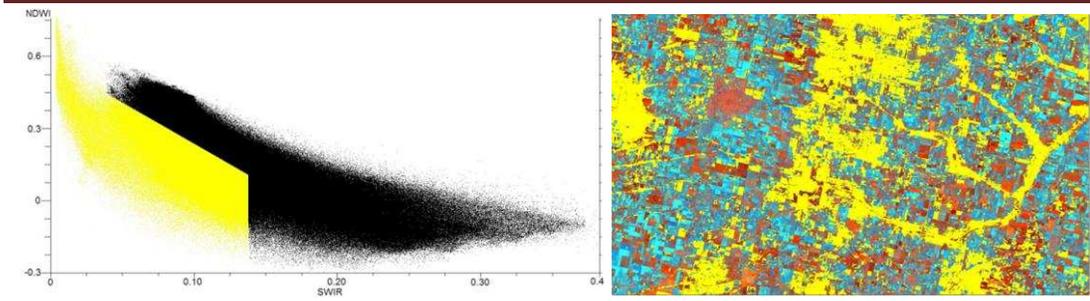


Figura A3 10. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 23 de enero de 2017

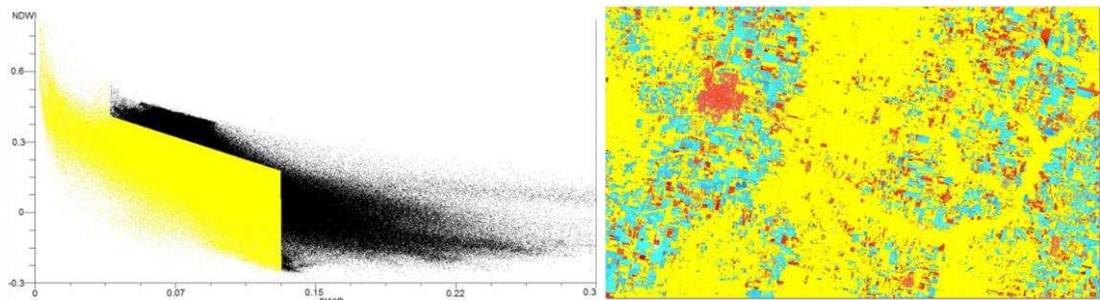


Figura A3 11. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 24 de febrero de 2017

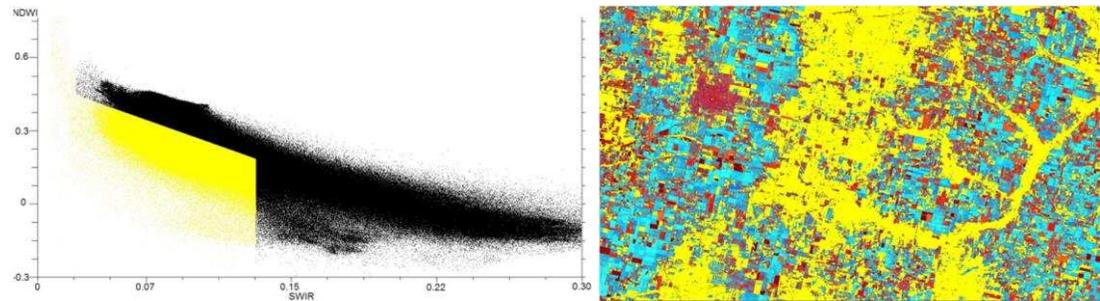


Figura A3 12. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 12 de marzo de 2017

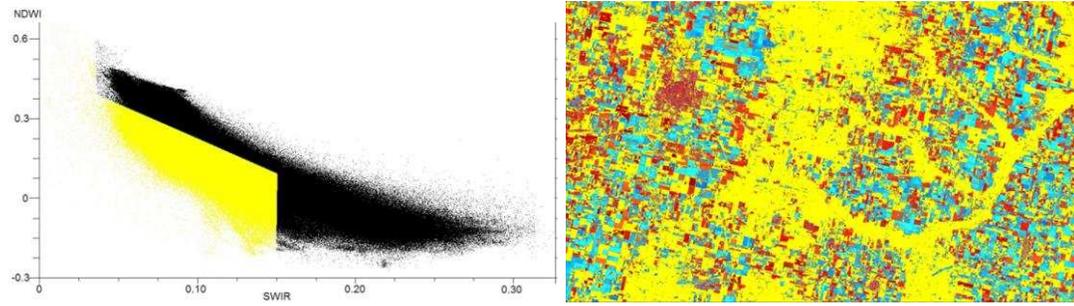


Figura A3 13. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 28 de marzo de 2017

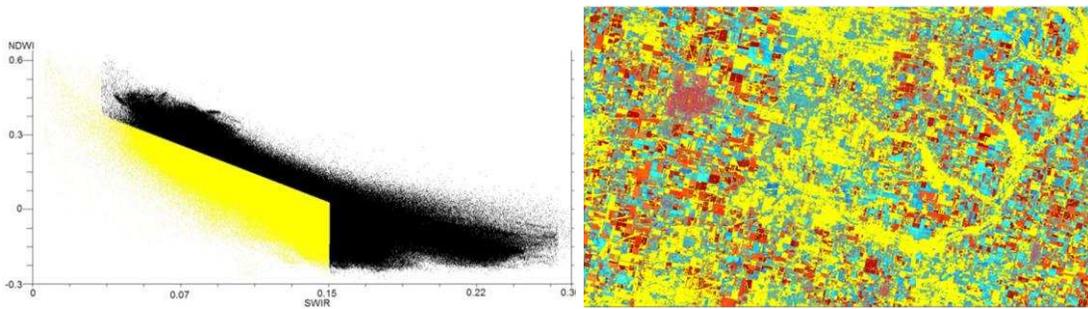


Figura A3 14. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 13 de abril de 2017

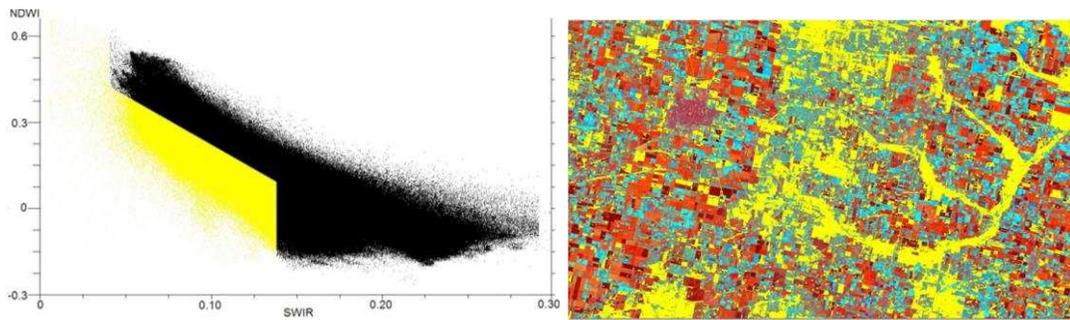


Figura A3 15. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 29 de abril de 2017

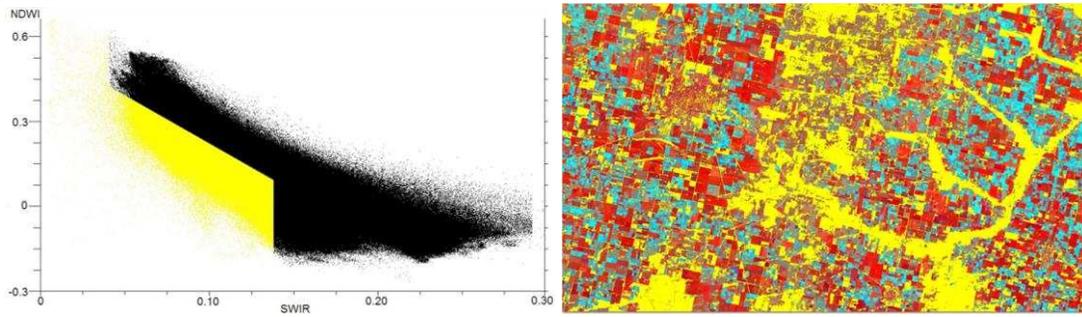


Figura A3 16. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 02 de julio de 2017

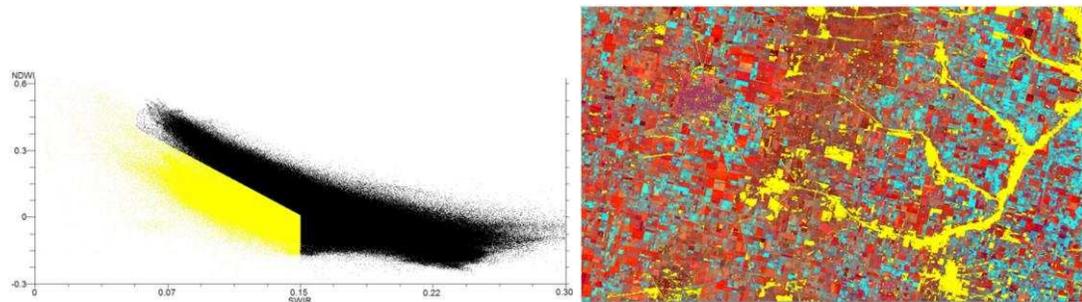


Figura A3 17. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 18 de julio de 2017

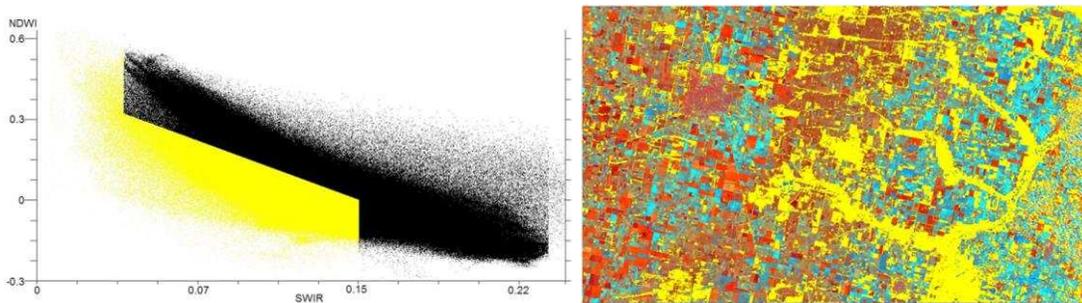


Figura A3 18. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 03 de agosto de 2017

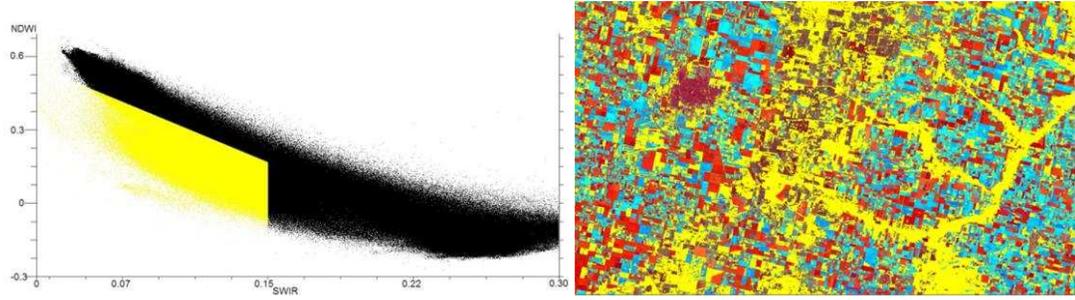


Figura A3 19. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 20 septiembre de 2017

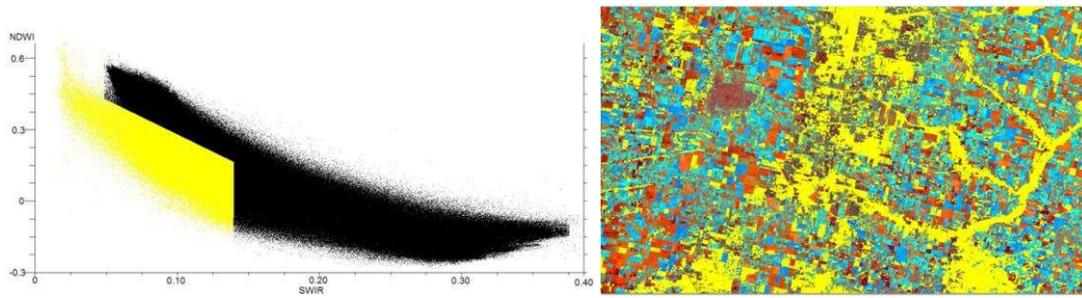


Figura A3 20. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 06 de octubre de 2017

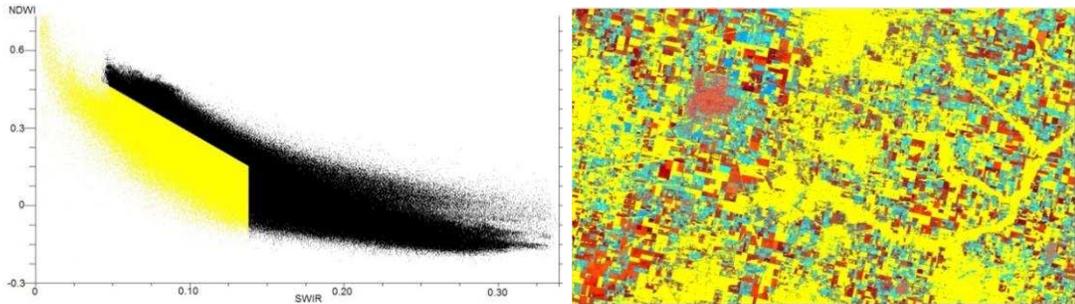


Figura A3 21. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 22 de octubre de 2017

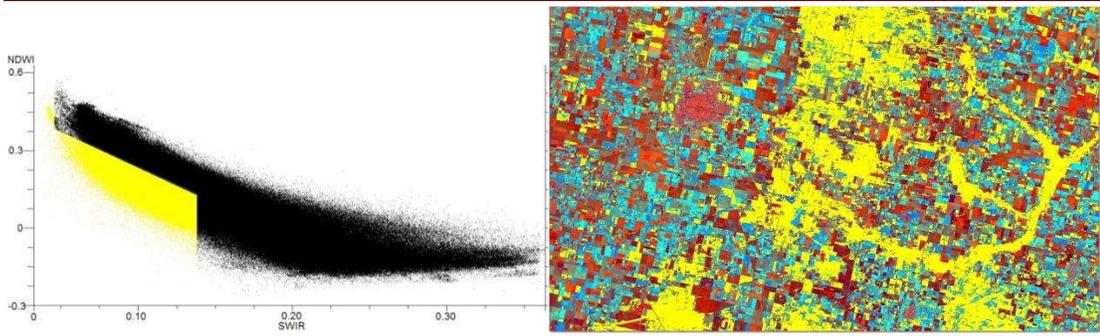


Figura A3 22. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 25 diciembre de 2017

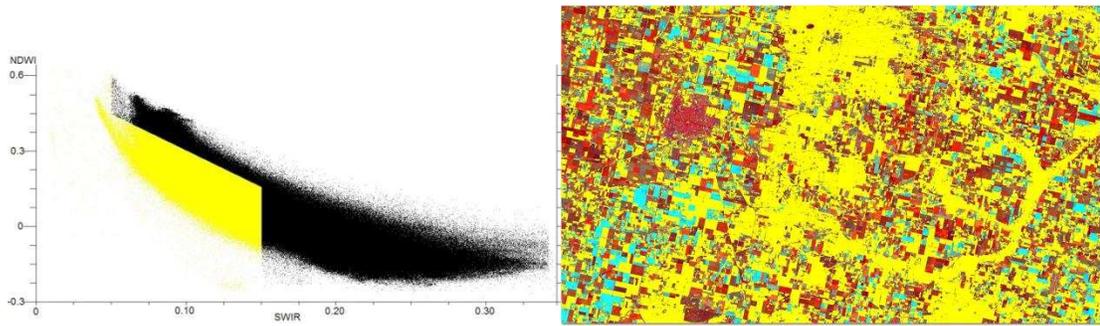


Figura A3 23. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 10 de enero de 2018

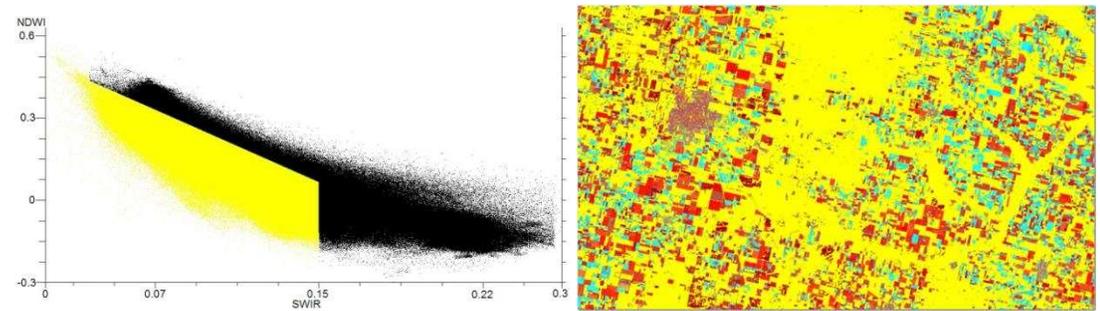


Figura A3 24. SWIR vs NDWI – Composición falso color SWIR – NIR – NDWI.
Imagen 16 de abril de 2018

Anexo 4. Modelo hidrológico semidistribuido continuo SWAT.

El SET-SF determina el uso de la tierra focalizando la explotación agrícola y ganadera. Posee siete clases con restricciones crecientes que indican la intensidad de la limitación; desde la I (óptima sin ningún tipo de práctica de manejo) a la VII (no apta). En las clases I y II se ubican las tierras consideradas típicamente agrícolas con nula a leve práctica de conservación; en las III y IV aquellas en las que sería necesario prácticas de manejo como por ejemplo: intercalar períodos de recuperación más o menos prolongados y/o construcción de terrazas u otros manejos especiales. Las clases V y VI, corresponden a tierras aptas para implantación de pasturas plurianuales y tolerantes a restricciones ambientales severas, en tanto que la clase VII se reserva para tierras inaptas (Giorgi et al, 2010). Cada suelo en una clase puede tener una o más combinaciones de acuerdo a las restricciones que posea y el nivel de prácticas de manejo requeridas para un uso seguro. Por ejemplo, la clase II/III wp no alcanza a ser considerada en la clase III wp porque requiere menos rigor en las prácticas de manejo.

Clases

I – II: Aptitud Agrícola Muy Alta – Alta

III – IV: Aptitud Agrícola – Ganadera Media

V – VI: Aptitud Ganadera Baja – Muy baja

VII: Inaptas

Cada clase puede ir acompañada de una subclase. Las subclases son divisiones de las clases que informan del tipo de problema que restringe la capacidad productiva del suelo y se establecen en función de los siguientes factores restrictivos.

Subclases

w = deficiencia del drenaje, **e**= erosión eólica, **h**= erosión hídrica, **s**= dificultad en la zona radicular ya sea por texturas gruesas - salinidad y/o alcalinidad, **c**= climáticas, **p**= dificultad de enraizamiento en los horizontes argílicos que no se deben a la salinidad, bajo nivel de fertilidad y/o sodicidad, **r**= riesgo a la erosión por estar en un terreno inclinado.

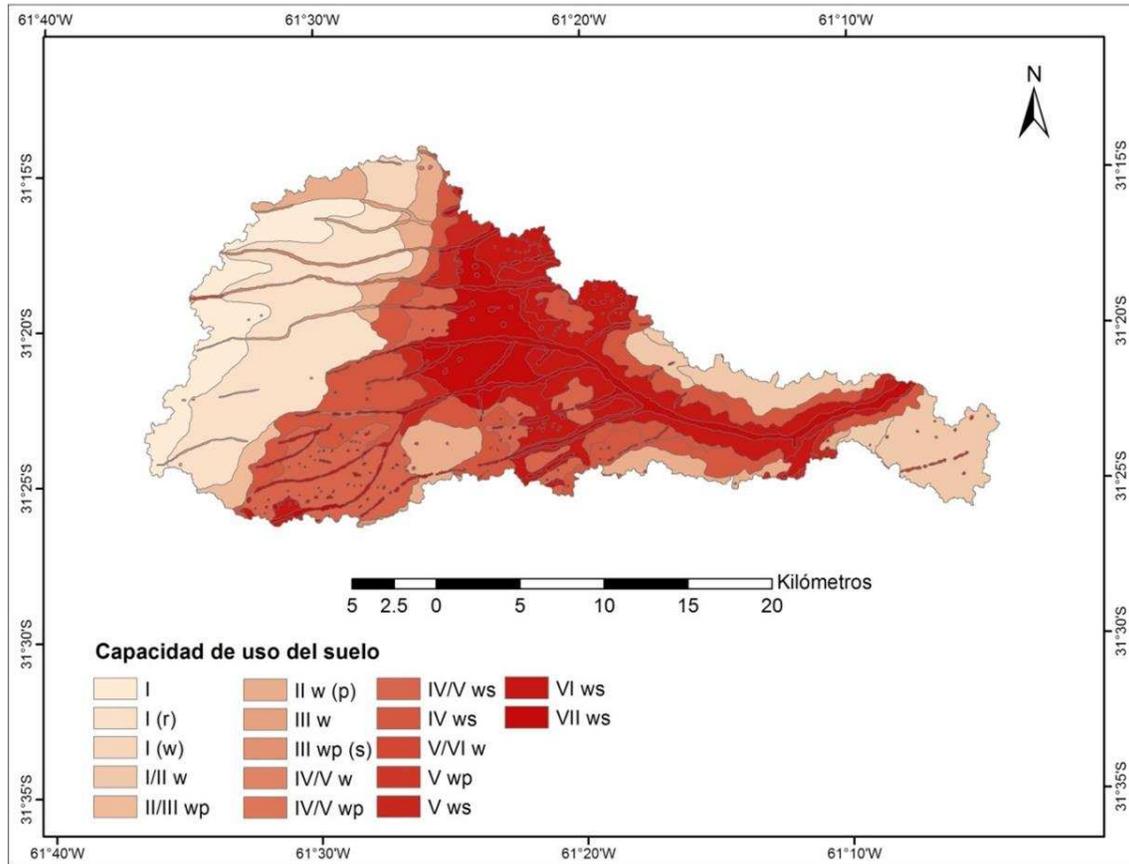


Figura A 4. 1. Capacidad de uso del suelo.

I: Agricultura sin restricción, **I r**: Agricultura con riesgo a la erosión, **I w**: Agricultura con restricción drenaje, **I/II w**: Agricultura con restricción drenaje y enraizamiento, **II wp**: Agricultura con restricción drenaje y enraizamiento, **II/III wp**: Agricultura con restricción drenaje y enraizamiento, **III w**: Agricultura – Ganadería con restricción drenaje, **III wps**: Agricultura – Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **IV ws**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **IV/V w**: Ganadería con restricción drenaje, **IV/V wp**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **IV/V ws**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **V wp**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **V ws**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **V/V I w**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **VI ws**: Ganadería con restricción drenaje y enraizamiento, **VII ws**: Inaptas para uso agropecuario.

ANEXOS

Tabla A 4. 1. Calculo funciones pedotransferencia para cada horizonte de cada serie de suelo.

SERIE	SNAM	HOR	HYGDRP	TEXT	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	ARCILLA	LIMO	ARENA	USLE_K
AURELIA	AUR	E	C	SIL	140	1.32	0.21	9.06	0.93	23.1	70.8	6.1	0.56
		Bt1			440	1.2	0.13	4.03	0.73	50.9	46.2	2.9	
		Bt2			800	1.26	0.14	1.68	0.12	50.8	46.5	2.8	
		Bt3			1300	1.3	0.15	1.67	---	47	49.9	3.1	
		BC			1680	1.34	0.15	1.63	---	43.4	52.8	3.9	
		C			1800	1.39	0.17	1.67	---	37.9	58	4	
		Ck			2250	1.39	0.16	1.67	---	---	---	---	
CASTELLANOS	CAS	A	C	SiCL	140	1.31	0.19	7.95	1.51	28	69.5	1.9	0.54
		E			190	1.29	0.21	8.9	0.89	24	73.5	2	
		Bt1			400	1.24	0.17	5.93	0.71	38.5	59.5	1.5	
		Bt2			700	1.22	0.15	5.35	0.39	42.5	56	1.3	
		Bt3			940	1.25	0.17	6.41	0.23	36	62.5	1.2	
		BC			1420	1.44	0.19	1.91	0.1	29.5	68	1.8	
		C			1600	1.48	0.18	2.21	0.09	27	65	7.1	
		Ck			2250	1.52	0.2	2.24	0.08	22	72	5.3	
CoLPR	CoLPR	Bt	D	C	500	1.36	0.13	1.01	0.71	48.1	26.5	25.4	0.38
ESPERANZA	ESP	A	B	SiCL	270	1.33	0.19	5.85	1.16	28.7	66.7	4.7	0.56
		BA			400	1.35	0.18	3.87	0.8	32.9	63.2	3.9	
		Bt1			680	1.17	0.12	2.31	0.48	59.4	38.6	2	
		Bt2			970	1.22	0.13	2.01	0.2	54.4	43.2	2.4	
		Bt3			1300	1.29	0.15	1.99	0.22	47	49.6	3.4	
		BC			1650	1.34	0.16	1.82	0.11	42.3	54	3.7	
		C			1800	1.47	0.18	1.9	0.04	29.1	66.2	4.7	
		Ck			2250	1.7	0.26	3.79	0.01	---	---	---	

ANEXOS

Tabla A 4. 2. Calculo funciones pedotransferencia para cada horizonte de cada serie de suelo (continuación).

SERIE	SNAM	HOR	HYGDRP	TEXT	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	ARCILLA	LIMO	ARENA	USLE_K
LEHMANN	LEH	Ap	B	SiCL	140	1.29	0.2	7.87	1.46	27	70	2.2	0.51
		A			230	1.29	0.2	6.82	1.35	29	69	1.6	
		E/B			330	1.32	0.19	5.55	1.11	28.5	69.5	1.5	
		Bt1			600	1.34	0.17	2.95	0.56	37	61	1.5	
		Bt2			820	1.37	0.18	2.84	0.49	34	64	1.4	
		Bt3			1050	1.38	0.18	2.47	0.35	33.5	63.5	2.7	
		BC			1300	1.47	0.19	2.33	0.19	26	69	4.3	
		C			1500	1.47	0.2	2.14	0.17	26	71.5	2.1	
PRUSIANAS	LPR	A	C	SIL	150	1.36	0.21	7.57	1.19	22.4	72.1	5.5	0.59
		E			220	1.35	0.19	5.24	1	28.2	66.9	4.9	
		Bt1			530	1.16	0.11	2.63	0.8	60.2	37.6	2.2	
		Bt2			830	1.23	0.13	2.5	0.24	51.9	43.6	4.5	
		Bt3			1200	1.39	0.16	1.66	0.19	38.3	56.6	5.1	
		BC			1590	1.52	0.19	2.12	0.17	24.9	67.6	7.5	
		C			2000	1.5	0.19	2.01	0.2	26	66.9	7.1	
		Ck			2250	1.7	0.26	3.72	0.35	---	---	---	
TUNAS	LTU	E1	C	SiCL	200	1.33	0.19	5.76	1.14	29	66.5	4.5	0.52
		E2			310	1.42	0.19	2.98	0.44	29	66	5.2	
		Bt1			700	1.24	0.13	1.96	0.31	51.5	44.5	4.4	
		Bt2			920	1.21	0.13	2.05	0.43	54.5	41	3.9	
		Bt3			1120	1.24	0.13	1.77	0.15	52.5	43.5	4	
		Bt4			1500	1.34	0.16	1.78	0.11	42	53	5.2	
		BC			2300	1.4	0.17	1.79	0.06	36	58.5	5.1	
		C			2800	1.43	0.18	1.79	0.03	33	61.5	5.2	

ANEXOS

Tabla A 4. 3. Calculo funciones pedotransferencia para cada horizonte de cada serie de suelo (continuación).

SERIE	SNAM	HOR	HYGDRP	TEXT	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	ARCILLA	LIMO	ARENA	USLE_K
PILAR	PIL	A	C	SIL	210	1.3	0.2	7.57	1.38	25.5	72	2.4	0.48
		BE			310	1.35	0.2	5.48	1.03	27	70	2.9	
		Bt1			600	1.34	0.17	3.06	0.6	35.5	62.5	1.4	
		Bt2			900	1.43	0.18	2.42	0.27	29	69	1.6	
		Bt3			1200	1.5	0.2	2.4	0.19	21.5	74.5	3.3	
		BC			1800	1.55	0.21	2.59	0.14	16.5	79.5	3.8	
RAFAELA	RAF	A	B	SIL	220	1.29	0.21	8.13	1.47	26	72	2.2	0.51
		BA			320	1.36	0.19	4.73	0.9	27.5	69	2.8	
		Bt1			630	1.33	0.17	2.78	0.51	38	59.5	2.1	
		Bt2			930	1.32	0.16	2.39	0.37	40.5	57.5	1.7	
		Bt3			1115	1.4	0.18	2.21	0.24	33	65	2.2	
		BC			1400	1.43	0.19	2.06	0.17	30.5	68	1	
		C			1500	1.45	0.18	2.04	0.11	29.5	65	4.8	
SANTA MARÍA NORTE	SMN	A	C	SIL	200	1.33	0.21	7.23	1.25	23.5	74	2.6	0.53
		E			300	1.4	0.21	5.11	0.83	22	75	2.5	
		Bt1			580	1.24	0.13	2.67	0.69	50	48.5	1.2	
		Bt2			880	1.25	0.13	2.16	0.36	50	48	1.3	
		Bt3			115	1.34	0.16	2.07	0.21	39.5	58	2	
		BC			1650	1.44	0.18	1.91	0.1	30	67.5	2.3	
		Ck			1800	1.52	0.2	2.03	0.07	22	74.5	3	

Para la preparación del mapa de tipos del suelo, el SWAT exige el ingreso de 21 parámetros; de los cuales 8 se deben ingresar a nivel de serie de suelo (Nombre de la serie de suelo, Unidad cartográfica, Número de horizontes presentes en la unidad cartográfica, Grupo hidrológico, Máxima profundidad de las raíces, Fracción de porosidad del cual los aniones son excluidos, Potencial o máximo volumen de grietas del perfil del suelo expresado como una fracción del total del volumen del suelo y Textura), 10 son requeridos a nivel de cada horizonte de la serie del suelo (Perfil, Densidad aparente del suelo, Capacidad de agua disponible, Conductividad hidráulica saturada, Porcentaje de carbono orgánico, Porcentaje de arcilla, Porcentaje de limo, Porcentaje de arena, Porcentaje de roca y Conductividad eléctrica), y los 3 parámetros restantes son requeridos solamente a nivel del horizonte superficial (Albedo del suelo, Ecuación universal de pérdida del suelo y Ph del horizonte superficial).

De los datos del INTA se obtuvieron 14 parámetros listados a continuación.

- ✓ TITLE: Nombre de la serie de suelo
- ✓ SNAM: Unidad cartográfica
- ✓ NLAYERS: Número de horizontes presentes en la unidad cartográfica
- ✓ SOL_ZMX: Máxima profundidad de las raíces
- ✓ TEXTURE: Textura
- ✓ SOL_Z(#): Perfil
- ✓ CLAY(#): Porcentaje de arcilla
- ✓ SILT(#): Porcentaje de limo
- ✓ SAND(#): Porcentaje de arena
- ✓ ROCK(#): Porcentaje de roca
- ✓ SOL_CBN(#): Porcentaje de carbono orgánico
- ✓ SOL_EC(#): Conductividad eléctrica
- ✓ SOL_Ph(#): Ph del horizonte superficial
- ✓ SOL_OM: Porcentaje de materia orgánica de la superficie del suelo

Cabe resaltar que la información previa puede ser dato de entrada directo al SWAT o indirecto al ser usado para determinar los 8 parámetros restantes. Un ejemplo claro fue el siguiente: para el cálculo de las características hidráulicas del suelo se precisó conocer el porcentaje de materia orgánica de la superficie del suelo.

- ✓ HYDGRP: Grupo hidrológico
- ✓ ANION_EXCL: Fracción de porosidad del cual los aniones son excluidos
- ✓ SOL_CRK: Potencial o máximo volumen de grietas del perfil del suelo, expresado como una fracción del total del volumen del suelo
- ✓ SOL_BD(#): Densidad aparente del suelo
- ✓ SOL_AWC(#): Capacidad de agua disponible
- ✓ SOL_K(#): Conductividad hidráulica saturada
- ✓ SOL_ALB(#): Albedo del suelo
- ✓ USLE_K(#): Ecuación universal de pérdida del suelo

El SWAT solicita que la información de cada tipo de suelo sea ingresada a la base de datos del modelo con el debido formato y unidades presentados en la siguiente Tabla A 4. 2 (Neitsch et al, 2012).

Tabla A 4. 2. Variables con unidades y formatos necesarios para modelización en SWAT.

Columna	Descripción	Unidades	Formato F90
Información requerida a nivel de serie de suelo			
TITLE	Nombre de la serie de suelo		a80
SNAM	Unidad cartográfica		a16
NLAYERS	Número de horizontes presentes en la unidad cartográfica		
HYDGRP	Grupo Hidrológico	s/u	a1
SOL_ZMX	Máxima profundidad de las raíces	[mm]	f12.2
ANION_EXCL	Fracción de porosidad del cual los aniones son excluidos	Fracción	f5.3
SOL_CRK	Potencial o máximo volumen de grietas del perfil del suelo, expresado como una fracción del total del volumen del suelo	Fracción volumen total suelo	f5.3
TEXTURE	Textura	s/u	a80
Información requerida a nivel de horizonte			
SOL_Z(#)	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el final de la capa	[mm]	f12.2

ANEXOS

Columna	Descripción	Unidades	Formato F90
SOL_BD(#)	Densidad de humedad-volumen	[g/cm ³]	f12.2
SOL_AWC(#)	Capacidad de agua disponible de la capa del suelo	[mm H ₂ O]/[mm suelo]	f12.2
SOL_K(#)	Conductividad hidráulica saturada	mm/hr	f12.2
SOL_CBN(#)	Contenido de Carbono Orgánico	% Wt	f12.2
CLAY(#)	Contenido de arcilla	% Wt	f12.2
SILT(#)	Contenido de limo	% Wt	f12.2
SAND(#)	Contenido de arena	% Wt	f12.2
ROCK(#)	Contenido de fragmentos de roca	% Wt	f12.2
SOL_EC(#)	Conductividad eléctrica	[dS/m]	f12.2
Información requerida a nivel de horizonte superficial			
SOL_ALB(#)	Albedo suelo húmedo	s/u	f12.2
USLE_K(#)	Ecuación Universal de Pérdida del Suelo	[ton m ² h]/[m ³ ton cm]	f12.2
SOL_Ph(#)	Ph	s/u	f12.2

HYDGRP (grupo hidrológico): El grupo hidrológico corresponde a las características de infiltración del agua según el tipo de suelo (textura, composición y profundidad del nivel freático). Está basado en cálculos del potencial de escorrentía y se clasifica en 4 grupos (A, B, C y D) de acuerdo a suelos con las mismas características. El grupo hidrológico “A” representa un bajo potencial de escurrimiento, mientras que el “D” atribuye un alto potencial de escurrimiento. Esta clasificación es vital para la aplicación del método de número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS). En esta tesis los diferentes tipos de suelos se caracterizaron de acuerdo a la clasificación propuesta por el SCS (Bradbury et al, 2000).

Tabla A 4. 3. Grupo hidrológico.

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando se encuentran muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Capacidad de infiltración > 76 [mm/h]	Arenosa Arenosa limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración entre 76-38 [mm/h]	Franco Franco arcillo arenoso Franco limoso
C	Lenta	Capacidad de infiltración entre 36-13 [mm/h]	Franco arcilloso Franco arcillo limoso Arcillo arenoso
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13 [mm/h]	Arcilloso

Tabla A 4. 4. Descripción de series del suelo según grupo hidrológico.

Grupo hidrológico	Descripción	Series de suelos
A	Suelos que transmiten gran cantidad de agua. Pueden ser: arenosos, arenosos limosos e inclusive de arenas gruesas. Están bien drenados y presentan alta tasa de infiltración cuando se encuentran totalmente húmedos.	//
B	Suelos que transmiten de manera moderada el agua. Presentan textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Pueden ser: Franco, Franco arcillo arenoso y Franco limoso. Están bien a moderadamente drenados y presentan una tasa moderada de infiltración cuando se encuentran totalmente húmedos.	Esperanza, Lehmann, Rafaela
C	Suelos que transmiten lentamente el agua. Presentan textura moderadamente fina a fina. Pueden ser: Franco arcilloso, Franco arcilloso limoso y arcillo arenoso. Estos suelos poseen un horizonte que dificulta el movimiento del agua. Presentan tasa baja de infiltración cuando se encuentran totalmente húmedos.	Aurelia, Castellanos, Prusianas, Tunas, Pilar, Santa María Norte
D	Suelos que transmiten muy lentamente el agua. Presentan principalmente textura arcillosa con alto nivel freático con un horizonte casi impermeable. La tasa de transmisión de agua es muy baja.	Colector Las Prusianas

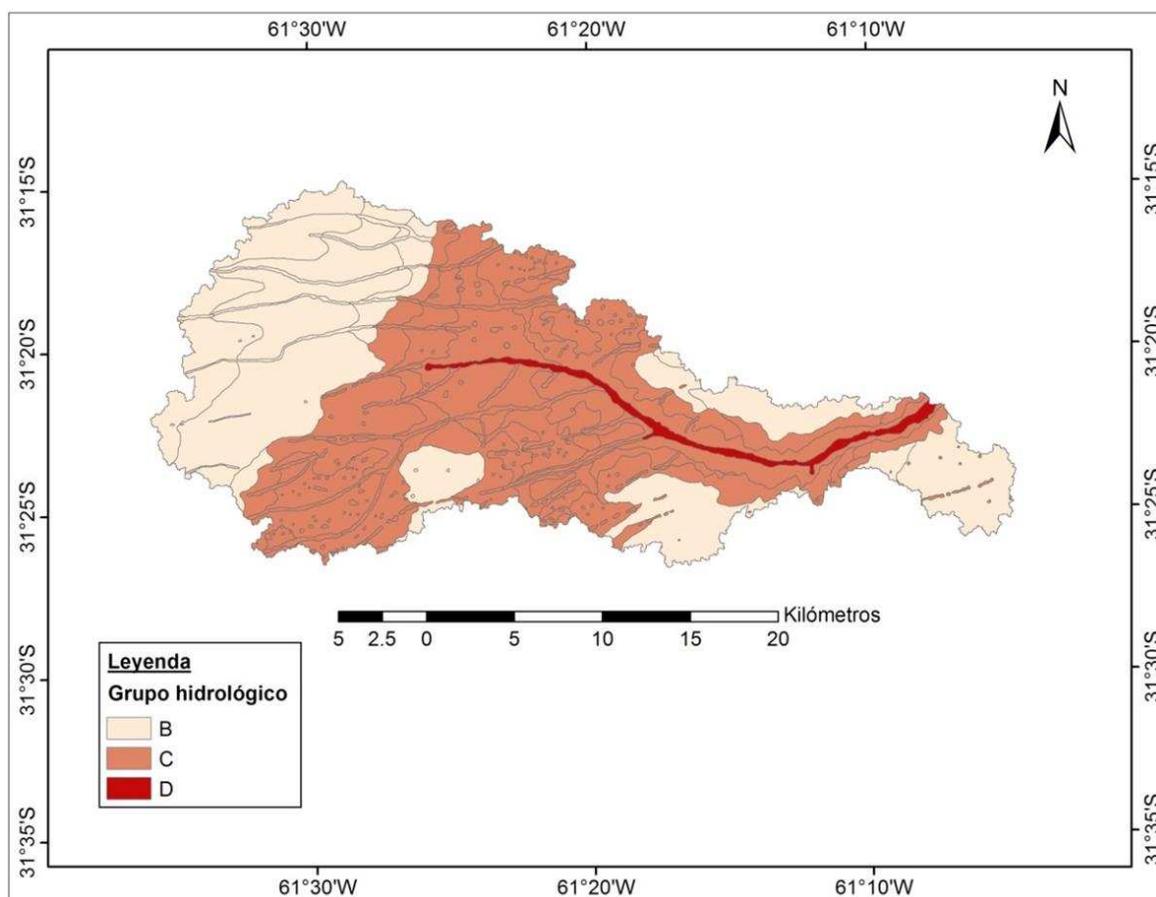


Figura A 4. 2. Mapa de suelos según el grupo hidrológico.

ANION_EXCL: La fracción de porosidad del cual los aniones son excluidos se asignó con un valor por default de 0.5 igual que en el trabajo publicado por Espindola, et al. (2014) *“Una visión regional de la disponibilidad de agua y la huella hídrica en la Argentina para la conservación del agua”*.

SOL_CRK: El potencial o máximo volumen de grietas del perfil del suelo fue calculado sólo en aquellos suelos de características vertisólicas mediante el método de Bronswik (Neitsch et al. , 2011). Los suelos que no cumplieran con esta condición se les asignó un valor de 0.5 que es el valor dado por default según la literatura citada.

SOL_{BD} (#): La densidad aparente del suelo es el peso de una unidad de volumen del suelo incluido el espacio poroso. Es un parámetro que indica la porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje; que son características importantes en torno al manejo de los suelos. Además, aporta información para la determinación del índice de compactación y permeabilidad.

El cálculo de este parámetro se realizó mediante el uso del Software características hidráulicas del suelo del USDA “*SPAW*” versión 6.02.75 disponible en <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/index.htm>. Su uso es recomendado por los desarrolladores del modelo SWAT. En la interfaz gráfica del SPAW se introdujo las clases texturales del suelo, el porcentaje de arena como también de arcilla y el programa las relacionó con el porcentaje de materia orgánica para obtener las características hidráulicas del suelo (Figura A 4.3).

SOL_{AWC}(#): La capacidad de agua disponible es el volumen aprovechable por las plantas en el suelo y se determina mediante la relación del punto de marchitez con la capacidad de campo del suelo. En el presente trabajo se obtuvo mediante el uso del software SPAW con se observa en la Figura A 4.3.

SOL_K(#): La conductividad hidráulica saturada “ K_s ” es una medida del flujo que atraviesa una sección del sistema poroso del suelo saturado (Amoozegar, 1992). Esta constituye un concepto más general que la permeabilidad del suelo, dado a que depende no sólo de las características del espacio poroso, sino también de la condición misma del agua (temperatura). Por tanto, la conductividad hidráulica saturada es variable espacialmente en el mismo tipo de suelo a distancias cortas (Sobieraj et al, 2004), por lo que para generar y calibrar modelos espaciales, un sólo valor medido o un pequeño conjunto de valores

difícilmente representa la K_s de un área, aun siendo pequeña y supuestamente homogénea (Mallants et al, 1997) (Sobieraj et al, 2004).

La K_s disminuye cuando también lo hace el contenido de humedad, ya que la porosidad efectiva se ve reducida y la tortuosidad aumenta dificultando la transmisión del agua. Por estas razones la conductividad hidráulica se considera como una función del contenido de agua del suelo (Klute y Dirksen, 1986). El cálculo de la K_s se determinó mediante el software SPAW (Figura A 4.3).

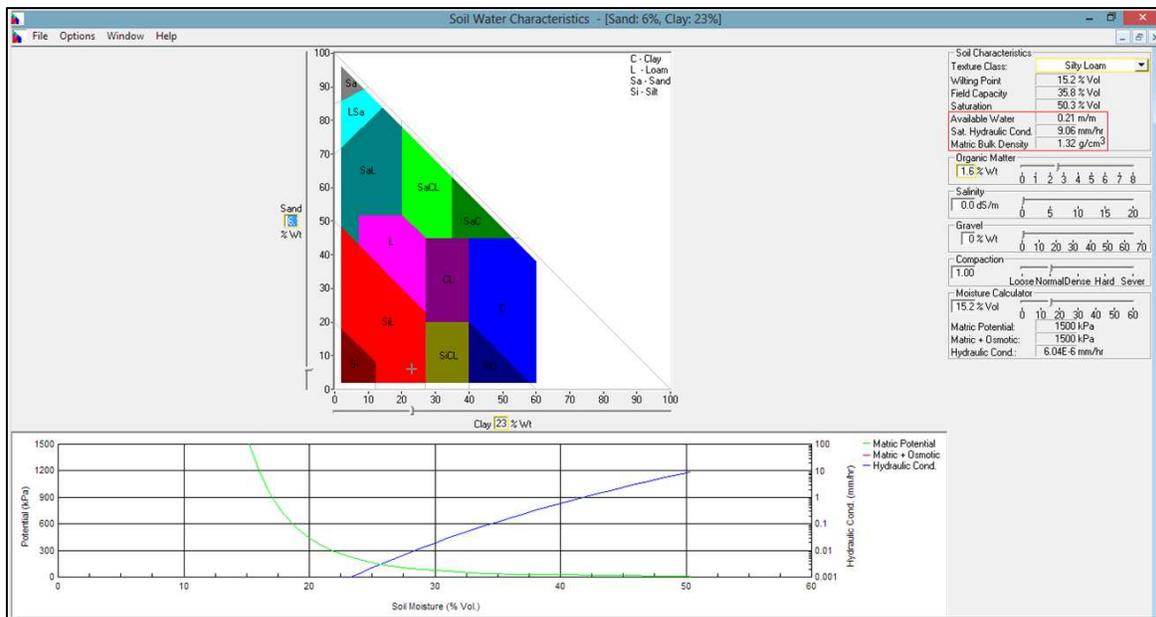


Figura A 4. 3. Caracterización de serie Aurelia.

SOL_ALB(#): El albedo es el porcentaje de radiación solar que se refleja por el suelo con respecto a la radiación que incide sobre él. Permite evaluar la insolación total del suelo, razón que lo lleva a ser importante en el cálculo del balance hídrico. En el presente trabajo se determinó mediante la Ecuación 4.1, propuesta por Baumer en 1990, está relacionando la cantidad de materia orgánica en el suelo, permite el cálculo correspondiente.

$$\text{SOL_ALB} = (0.6/\exp(0.4*\text{SOL_OM})) \quad (4.1)$$

SOL_OM: Porcentaje de materia orgánica de la superficie del suelo

USLE_K(#): El factor de erodabilidad del suelo determinado por la Ecuación universal de pérdida del suelo USLE de Wischmeier y Smith (1962), tiene como objetivo cuantificar la erosión hídrica en una unidad hidrológica. La Ecuación 4.2 es producto de 10.000 ensayos realizados en Estados Unidos en parcelas experimentales con diferentes tipos de suelos sometidos a precipitaciones controladas. Esta ecuación empírica depende de las características del suelo como por ejemplo: estructura, textura, porcentaje de materia orgánica y permeabilidad.

$$\begin{aligned} \text{USLE_K: } & (((2.1*\text{Factor M}^{1.14})*10^{(-4)} * (12 - \text{SOL_OM})) + 3.25 * (\text{Factor B}-2) \\ & + 2.5 * (\text{Factor C}-3)) * 1.2928) / 100 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Cabe resaltar que es necesario calcular previamente 3 factores correspondientes a la relación textural de la capa superficial del suelo (factor M), codificación estructural del suelo (factor B) y codificación de la permeabilidad del suelo (factor C) que se detallan a continuación:

Factor M: Es relación textural de la capa superficial del suelo. Se calcula según Correa (2003) como el producto del porcentaje de partículas comprendidas entre 0.002 y 0.05 [mm] de diámetro (porcentaje de Limo) y el porcentaje de partículas comprendidas entre 0.05 y 2 [mm] de diámetro (porcentaje de arena). El resultado por el producto de 100 menos el porcentaje de arcilla (Ecuación 4.3).

$$\text{Factor M} = (\% \text{Limo} + \% \text{Arena}) * (100 - \% \text{Arcilla}) \quad (4.3)$$

Factor B: Valor de granulometría del suelo. Calculado según el USDA mediante las características de la clase estructural del suelo (grado, forma y tamaño).

Tabla A 4. 5. Calculo del factor B.

Estructura			
Grado	Forma	Tamaño	Código (Factor B)
Sin estructura		Muy fina	4
Débil	Granular	Media	3
	Bloqueangulares	Media	3
Moderada	Granular	Muy fina	1
		Fina	2
		Media	2
	Bloqueangulares	Muy fina	2
		Media	2
Fuerte	Granular	Media	2
	Bloqueangulares	Fina	2

Factor C: Correlaciona la permeabilidad del suelo con la clase textural del mismo y asigna un código que representa la permeabilidad.

Tabla A 4. 6. Cálculo del factor C.

Textura	Permeabilidad	Código (Factor C)
Arcilla	Muy lenta	6
Arcillo arenoso, Arcillo limoso, Franco arcillo limoso	Lenta	5
Franco arcilloso arenoso, Franco arcilloso	Lenta o Moderada o Moderadamente lenta	4
Franco limoso, Franco	Moderada	3
Arenoso franco, Franco arenoso	Moderada a Rápida o Moderadamente rápida	2
Arena	Rápida a Muy rápida	1

A modo de ejemplo se presenta la Figura A 4.4 que muestra la interfaz gráfica de 1 (AURELIA) de las 10 series de suelos ingresadas a la base de datos del usuario en SWAT, modificando el archivo Access (Figura A 4.5). Todas las 10 series de suelos cargadas en la base de datos del modelo debieron ser igualmente relacionadas en la interfaz gráfica.

Figura A 4. 4. Características de la serie Aurelia en la interfaz de arcSWAT.

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK
203		1	AURELIA		100	7	C	750	0.5	0.5
204		1	CASTELLANOS		100	8	C	750	0.5	0.5
205		1	CoLPR		100	1	D	500	0.5	0.5
206		1	ESPERANZA		100	8	B	1000	0.5	0.5
207		1	LEHMANN		100	8	B	1000	0.5	0.5
208		1	PRUSIANAS		100	8	C	750	0.5	0.5
209		1	TUNAS		100	8	C	750	0.5	0.5
210		1	PILAR		100	6	C	500	0.5	0.5
211		1	RAFAELA		100	7	B	750	0.5	0.5
212		1	SANTAMARIAN		100	7	C	1000	0.5	0.5

Figura A 4. 5. Series de suelos ingresados a la base de datos del SWAT.

El modelo SWAT debe ser alimentado con 14 estadísticos del clima que se mencionan a continuación:

- **PCPMM:** Promedio mensual de la precipitación diaria [mm]
- **PCPSTD:** Desviación estándar mensual de la precipitación [mm]
- **PCPSKW:** Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación [mm]
- **PR_W1:** Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco [n/a]
- **PR_W2:** Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo [n/a]
- **PCPD:** Promedio mensual de número de días de lluvia [n/a]
- **RAINHHMX:** Promedio de lluvia máxima de media hora [mm]
- **TMPMX:** Promedio de temperaturas máximas °C
- **TMPMN:** Promedio de temperaturas mínimas °C
- **TMPSTDMX:** Desviación estándar mensual de temperaturas máximas °C
- **TMPSTDMN:** Desviación estándar mensual de temperaturas mínimas °C
- **SOLARAV:** Promedio de la radiación solar [MJ/m²]
- **DEWPT:** Promedio temperatura de punto de rocío °C
- **WDAV:** Promedio velocidad del viento [m/s]

Hay dos maneras de determinar los estadísticos climáticos, la primera es utilizar un ejecutable llamado *.pcpSTAT* (Liersch, 2003) en donde se declara el nombre del archivo, el año de inicio de la serie de datos y como resultado se obtienen 6 de los 14 estadísticos necesarios. La segunda opción y la recomendada por los desarrolladores del modelo SWAT es mediante un generador del clima (WGEN) disponible en <https://swat.tamu.edu/software/>.

Este archivo Access preparado por Essenfelder (2016) determina los 14 estadísticos con base en la información propia de la estación en la cuenca (R87359). El formato de recepción de los datos legible por el WGEN es estrictamente independiente por variable, por ende, es necesaria la creación de diversos archivos .txt con formatos únicos como se explica a continuación.

Estos archivos serán determinantes al momento de ejecutar correctamente el Access. Además, el WGEN debe estar almacenado en el mismo directorio de los archivos .txt para evitar errores del sistema.

El WGEN necesita los archivos .txt de las siguientes variables: precipitación, humedad relativa, precipitación máxima en 30 minutos, velocidad del viento y temperaturas mínimas y máximas. El formato correcto para las primeras 4 variables se presenta en la Figura A 4.6. En la primera fila se debe ingresar la expresión “Text”, en la segunda fila la fecha de inicio de la serie de datos a nivel diaria (MM/dd/AAAA), en la tercera fila se ingresa la fecha del último registro con el formato de fecha ya citado. A partir de la fila 4 se declaran los valores correspondientes a cada variable hasta el valor final de la serie.

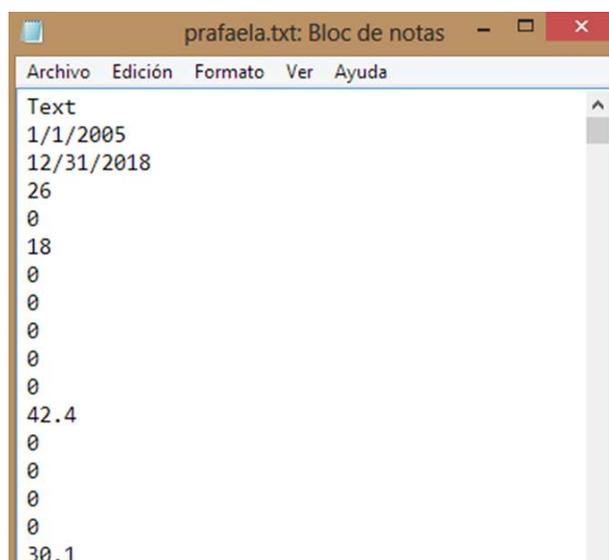


Figura A 4. 6. Formato de entrada de la variable precipitación al WGEN.

Para el caso del archivo .txt de la variable temperatura, el formato cambia a partir de la fila 4 porque se debe declarar el valor de temperatura máxima y mínima respectivamente a escala diaria y deben estar separados por una coma como se observa a continuación:

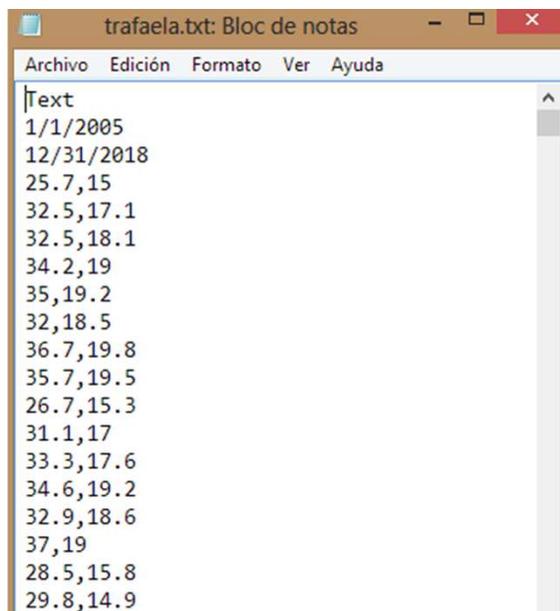


Figura A 4. 7. Formato de entrada de la variable temperatura al WGEN.

Con la información climática organizada en los archivos .txt, se lleva a cabo el cálculo de cada uno de los estadísticos requeridos por el SWAT ejecutando el Access (.mdb) desarrollado por Essenfelder (2016). Los resultados obtenidos se visualizan en la Tabla A 4.7.

ANEXOS

Tabla A 4. 7. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Rafaela (INTA).

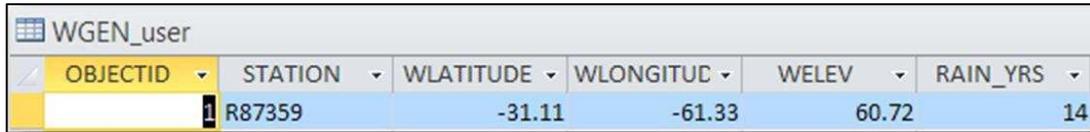
Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	32.3	30.24	28.02	25.55	21.23	18.60	18.46	20.72	23.10	25.80	29.24	31.25
TMPMN	18.3	17.81	15.10	13.32	10.45	7.16	6.76	7.73	10.12	12.77	15.08	17.23
TMPSTDMX	3.89	4.20	3.90	4.59	4.53	4.21	5.20	5.63	5.26	4.61	4.32	3.87
TMPSTDMN	2.98	3.19	3.25	3.83	3.95	4.39	4.71	4.58	3.78	3.42	2.96	2.99
PCPMM	115.3	165.5	149.4	95.95	35.24	21.31	11.21	25.34	42.41	89.86	121.4	136.8
PCPSTD	11.8	16.26	14.36	9.87	4.48	3.72	2.46	4.52	5.31	8.15	12.19	14.46
PCPSKW	4.84	3.68	3.91	4.72	5.40	7.92	12.00	8.60	5.58	3.82	4.50	6.46
PR_W1_	0.21	0.21	0.20	0.17	0.12	0.09	0.08	0.07	0.14	0.20	0.23	0.28
PR_W2_	0.32	0.50	0.38	0.48	0.42	0.41	0.38	0.40	0.35	0.40	0.40	0.33
PCPD	7.36	8.07	7.79	7.29	5.50	3.64	3.43	3.07	5.36	7.57	8.50	8.86
RAINHHMX	53.7	78.50	55.70	32.70	24.25	4.80	13.50	21.50	37.00	29.75	34.00	34.70
SOLARAV	24	21.41	18.71	16.34	15.55	13.76	16.10	18.90	20.74	20.49	23.36	23.33
DEWPT	17.5	18.72	16.40	14.05	12.37	8.66	7.89	6.69	9.31	13.24	12.81	12.96
WNDVAV	3.68	3.54	3.23	3.34	3.35	3.34	3.63	3.94	4.03	5.01	5.10	4.59

Donde:

TMPMX: Temperatura máxima promedio del aire en el mes [°C], **TMPMN:** Temperatura mínima promedio del aire en el mes [°C]
TMPSTDMX: Desviación estándar de la temperatura máxima del aire en el mes [°C], **TMPSTDMN:** Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en el mes [°C], **PCPMM:** Cantidad de precipitación promedio en el mes [mm], **PCPSTD:** Desviación estándar de la precipitación en el mes [mm], **PCPSKW:** Coeficiente de asimetría de la precipitación en el mes, **PR_W1:** Probabilidad de un día húmedo seguido de un día seco en el mes, **PR_W2:** Probabilidad de un día húmedo seguido de un día húmedo en el mes, **PCPD:** Número de días de precipitación en el mes [día], **RAINHHMX:** Intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos en el mes [mm], **SOLARAV:** Radiación solar promedio en el mes [MJ/m²/día], **DEWPT:** Temperatura promedio del punto de rocío en el mes [°C], **WNDVAV:** Velocidad del viento promedio en el mes [m/s]

ANEXOS

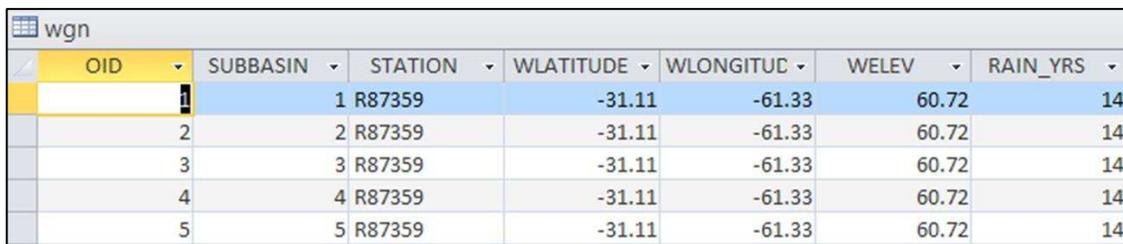
Los resultados de los estadísticos deben ser ingresados junto con los datos de la estación climática a la base de datos .mdb del SWAT.



OBJECTID	STATION	WLATITUDE	WLONGITUD	WELEV	RAIN_YRS
1	R87359	-31.11	-61.33	60.72	14

Figura A 4. 8. Estadísticos climáticos de la base de datos del SWAT.

Para este caso, en el archivo .mdb del proyecto se le atribuye a cada una de las 5 subcuencas la información contenida en la estación climática R87359 para que el programa los pueda leer correctamente. En caso de no ser declarada la estación para la subcuenca, el SWAT automáticamente relaciona la subcuenca con la estación más cercana.



OID	SUBBASIN	STATION	WLATITUDE	WLONGITUD	WELEV	RAIN_YRS
1		R87359	-31.11	-61.33	60.72	14
2		R87359	-31.11	-61.33	60.72	14
3		R87359	-31.11	-61.33	60.72	14
4		R87359	-31.11	-61.33	60.72	14
5		R87359	-31.11	-61.33	60.72	14

Figura A 4. 9. Estación meteorológica ingresada en la base de datos del SWAT.

Debidamente ingresada la información del usuario en la base de datos del SWAT, es necesario verificar en la interfaz gráfica que se hayan cargado los datos y que todo se encuentre actualizado como se observa en las Figura A 4.10.

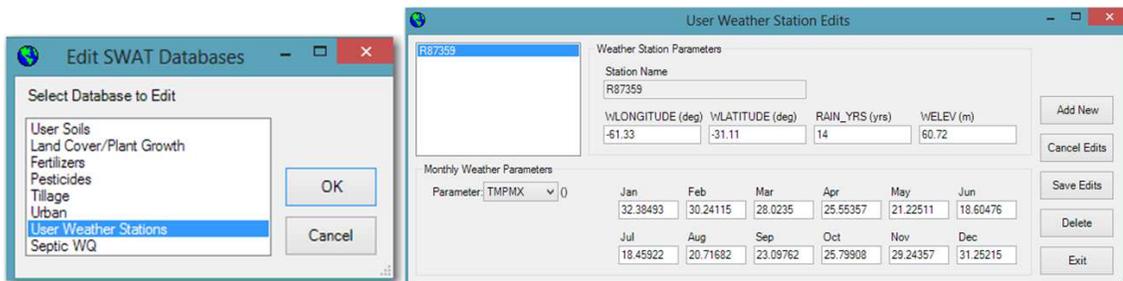


Figura A 4.10. Interfaz gráfica arcSWAT con estación meteorológica.

Póstumo al ejercicio de cargar la estación climática, SWAT requiere que se vincule a la estación climática los datos de precipitación, humedad relativa, radiación solar, temperaturas máximas y mínimas, como también la velocidad del viento. Para ello, dentro de una nueva carpeta el Access automáticamente crea y almacena los siguientes archivos de acuerdo al formato para cada variable climática exigido por el SWAT.

- pcpfork.txt: información de la estación y variable precipitación
- p87359.txt: registros de precipitación a escala diaria
- rhfork.txt: información de la estación y variable humedad relativa
- rh87359.txt: registros de humedad relativa a escala diaria
- tmpfork.txt: información de la estación y variable temperaturas
- t87359.txt: registros de temperaturas máximas y mínimas a escala diaria
- wnfork.txt: información de la estación y variable velocidad del viento 2 [m]
- w87359.txt: registros de velocidad del viento a escala diaria

Los archivos correspondientes a la precipitación, humedad relativa y velocidad del viento tienen el mismo formato presentado en la Figura A 4.11. Es importante visualizar que el nombre declarado en el archivo “pcpfork.txt” debe coincidir con el nombre de archivo .txt de precipitación en donde se encuentran los registros y que en su primera fila ahora debe estar la fecha del primer dato con el formato (AAAA/MM/dd). Los datos se ingresan a partir de la fila 2 hasta el último registro.

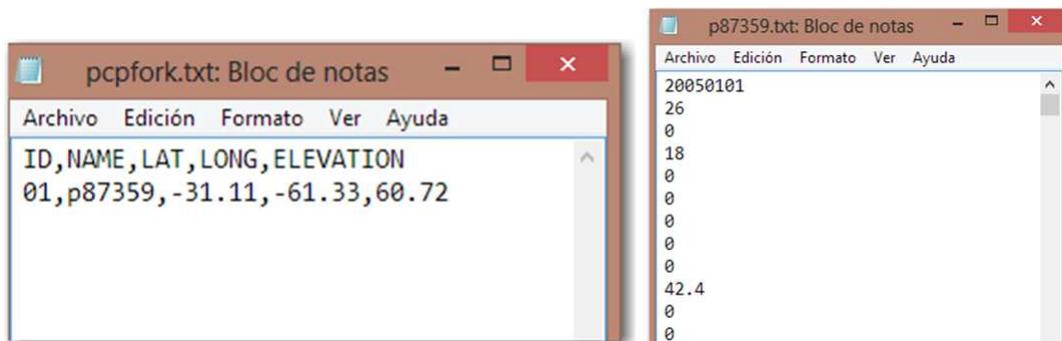


Figura A 4.11. Formato de ingreso variables climáticas.

ANEXOS

El archivo de temperaturas máximas y mínimas tiene el formato presentado en la Figura A 4.12. La fila 1 se debe a la fecha del primer dato con el formato (AAAA/MM/dd). Es importante visualizar que el nombre declarado en el archivo “tmpfork.txt” debe coincidir con el nombre de archivo .txt de temperaturas y que a partir de la fila 2 se presenta cada registro diario (uno por fila) de temperatura máxima y mínima separados con una coma.

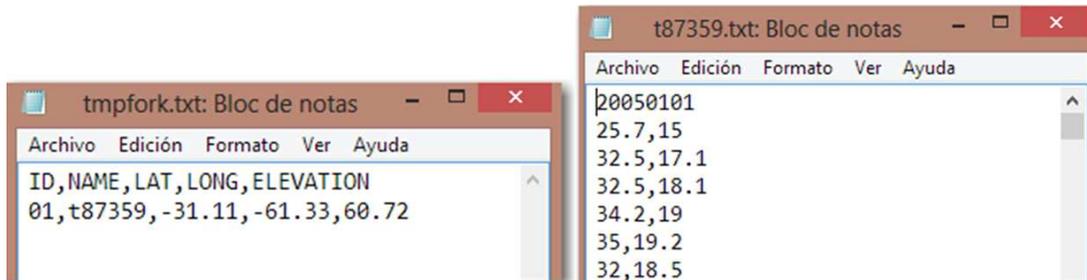


Figura A 4.12. Formato de ingreso variables temperaturas máximas y mínimas.

En la interfaz del SWAT se ingresa la pestaña de definición de las variables climáticas y se selecciona la base de datos ingresada por el usuario que es donde se encuentra la estación R87359. Igualmente en las otras pestañas se selecciona escala diaria en la precipitación y se ingresa el archivo.txt que contiene la información de la estación y de cada variable climática como se muestra en las Figuras A 4.13.

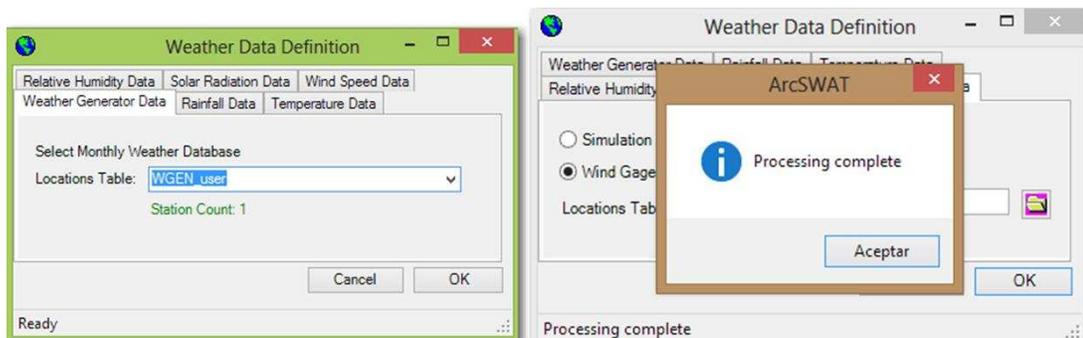


Figura A 4.13. Carga de información climática en el arcSWAT.

Dentro del análisis propuesto del HRU en la metodología, se fijaron 6 configuraciones para verificar la pérdida de información variando los umbrales para obtener fortalezas o debilidades de cada una, en función de seleccionar la configuración más adecuada para intentar representar el sistema físico de la cuenca.

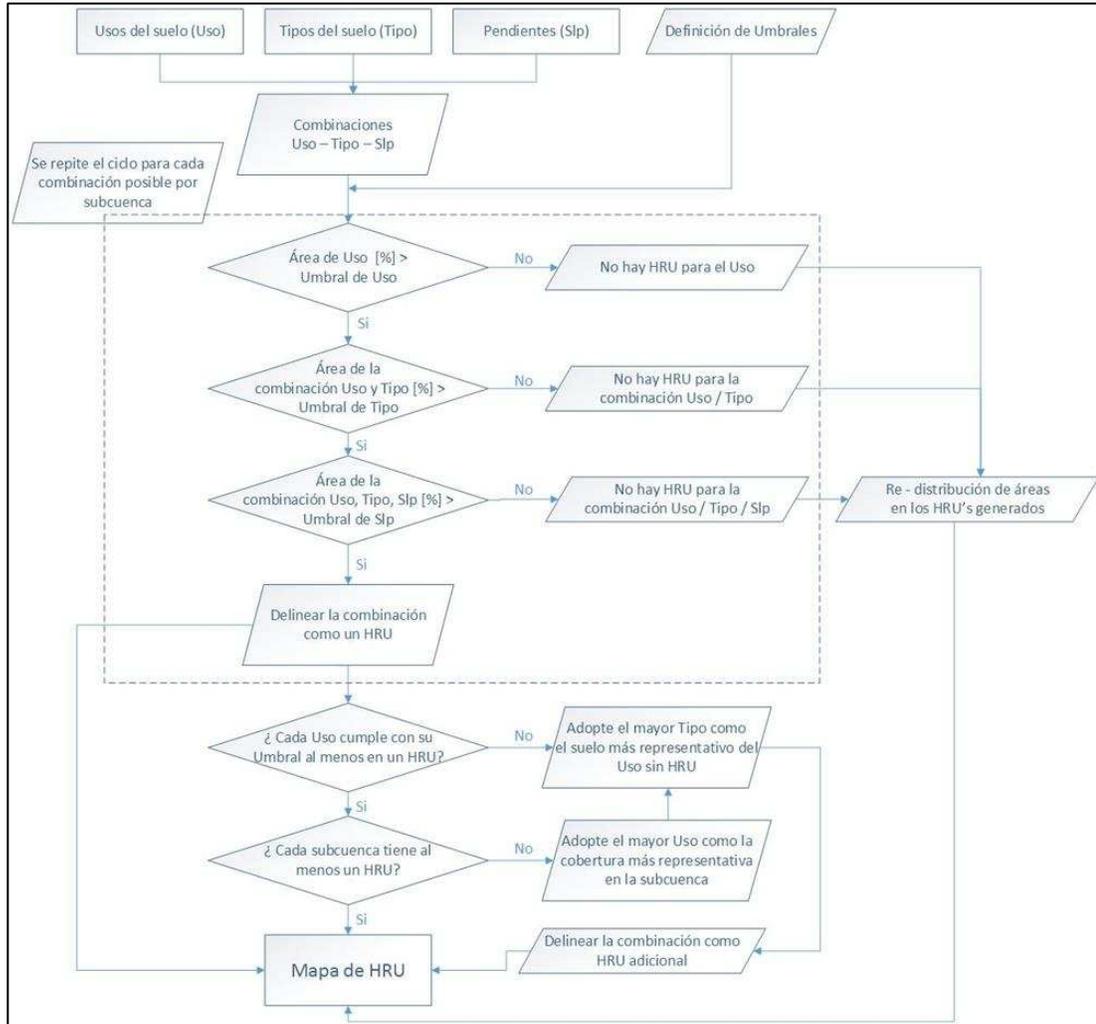


Figura A 4.14. Diagrama de flujo del algoritmo del SWAT en la definición de HRU mediante umbrales, modificado de (Her et al, 2015).

Generalmente se declaran umbrales entre 5% a 20% (EPA, 2013; Han et al, 2012; Sexton et al, 2010; Srinivasan et al, 2010) aunque algunas aplicaciones se han realizado con bajo o no umbrales cuando es importante preservar cada característica única del paisaje en la representación del modelo hidrológico como en nuestro caso (Chaubey et al, 2010; Chiang et al, 2010).

Cabe aclarar que para la creación de un HRU se deben satisfacer secuencialmente los 3 umbrales declarados, siguiendo el orden: uso del suelo, tipo de suelo condicionado por la capa de uso del suelo y por último las pendientes, que están condicionadas por los umbrales de las capas uso y tipo del suelo. Si no se cumple alguna de las condiciones se definirá el HRU para la subcuenca con la información que más aparezca en la cuenca (HRU's característico).

Por otro lado, Her, et al. (2015) y colaboradores del desarrollo del modelo SWAT; presentaron un análisis de la configuración de umbrales que arrojó resultados satisfactorios. En base a examinar el impacto de 36 umbrales en el número, área y entropía de las HRU versus la simulación hidrológica resultante, calidad de agua, disposición de nutrientes y producción de sedimentos. Concluyeron que la selección de umbrales en el proceso de definición del HRU's tiene un fuerte impacto en los resultados de las simulaciones. Observaron que al aumentar el umbral de usos del suelo se afecta directamente la hidrología, el crecimiento de la planta (nutrientes), como también la calidad de agua. Al modificar el umbral de tipos del suelo también se afecta la calidad del agua y al aumentar el umbral de pendientes se afecta en mayor proporción la producción de sedimentos. Recomiendan que lo más adecuado es la no utilización de umbrales; para evitar la pérdida de información y obtener la mejor respuesta hidrológica. Más aún cuando se trabaja en zonas de llanura en donde la hidrología de la cuenca es tan compleja.

Este estudio aportó en la comprensión de la definición estratégica del HRU para representar la cuenca Arroyo las Prusianas, manteniendo las principales características del paisaje en la toma de decisiones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta la Tabla A 4.8 con los resultados de aplicar diversas configuraciones de umbrales. Se pudo observar que en la mayoría se conduce a una pérdida de información que estaría modificando el paisaje y el sistema físico dentro del SWAT.

Existe entonces una relación inversa entre la cantidad de información incorporada en el modelo SWAT y el grado del umbral seleccionado en la definición del HRU. Por esta razón es necesario entender que al aplicar un umbral en una capa de información (uso/tipo/pendiente), los HRU's tendrán un grado de disminución de información proporcional al umbral en % (exceptuando en el caso de umbral 0 %). Significa que aplicar un umbral se conduce a la pérdida de combinaciones posibles porque como resultado el modelo adopta las clases más representativas de la cuenca en conjunto; sesgando la cantidad de HRU's generados al eliminar las combinaciones menos representativas.

Un ejemplo claro es la sensibilidad intrínseca en la capa de tipos del suelo porque al aumentar su umbral, la heterogeneidad del paisaje disminuye fuertemente más que con la capa de usos del suelo. Pero esto se debió también a que como en principio se le aplica el umbral a la capa de usos del suelo, el umbral aplicado a los tipos de suelos inicialmente ya está condicionado al raster de los usos del suelo.

La configuración de los umbrales seleccionada fue la 0 – 0 – 0 %. Se optó por la no consideración de umbrales para intentar modelar las VSA's porque tanto la capa del uso como el tipo del suelo son los factores más importantes a representar en la modelación ya que regulan en el SWAT gran parte de la hidrología. Además, era vital que el modelo en construcción representara el uso natural del suelo conservando todo el procesamiento que se le realizó al MDE.

Tabla A 4. 8. Selección de umbrales en SWAT.

Uso, tipo y pendiente %	HRU's generados	Fortalezas	Debilidades
0 – 0 – 0	395	Es una configuración con mucho detalle que redujo la pérdida de información. Lo anterior en pro de intentar representar la distribución de las VSA's.	La mayor limitante de esta configuración se debió al recurso computacional porque a mayor detalle, la cantidad de HRU's generados en la modelación serán mayores y con ello los recursos del PC.
10 – 10 – 10	102	Para el objetivo principal del presente estudio, la utilización de umbrales no aportó ningún beneficio a destacar.	Esta configuración solo consideró las clases de usos del suelo: pasturas, suelo húmedo y vegetación con agua. Igualmente, las pendientes se vieron condicionadas en gran magnitud por los umbrales de uso y tipo de suelo.
10 – 0 – 20	116		Esta configuración solo consideró las clases de usos del suelo: pasturas, suelo húmedo y vegetación con agua. Además, eliminó del mapa de pendientes la categoría 0 – 1 [%] aun cuando es importante modelar estas zonas.
10 – 20 – 0	74		Esta configuración solo consideró las clases de usos del suelo: pasturas, suelo húmedo y vegetación con agua. Para cumplir con los 3 umbrales, SWAT adoptó pendientes >5% en lugares en que no exceden el 2%.
20 – 0 – 10	175		Esta configuración solo consideró las clases de usos del suelo: pasturas, suelo húmedo y vegetación con agua. Lo que generó alta pérdida de información.
0 – 20 – 10	102		Esta configuración uniformizó los tipos de suelos en la cuenca y sólo tuvo en cuenta las pendientes por encima del 2%.

En términos generales, los parámetros de mayor sensibilidad en el modelo son los que presentan valor alto de “t – stat” y bajo de “p – value”. En total fueron 19 parámetros los que respondieron mayormente al análisis de sensibilidad (Figura A 4.15).

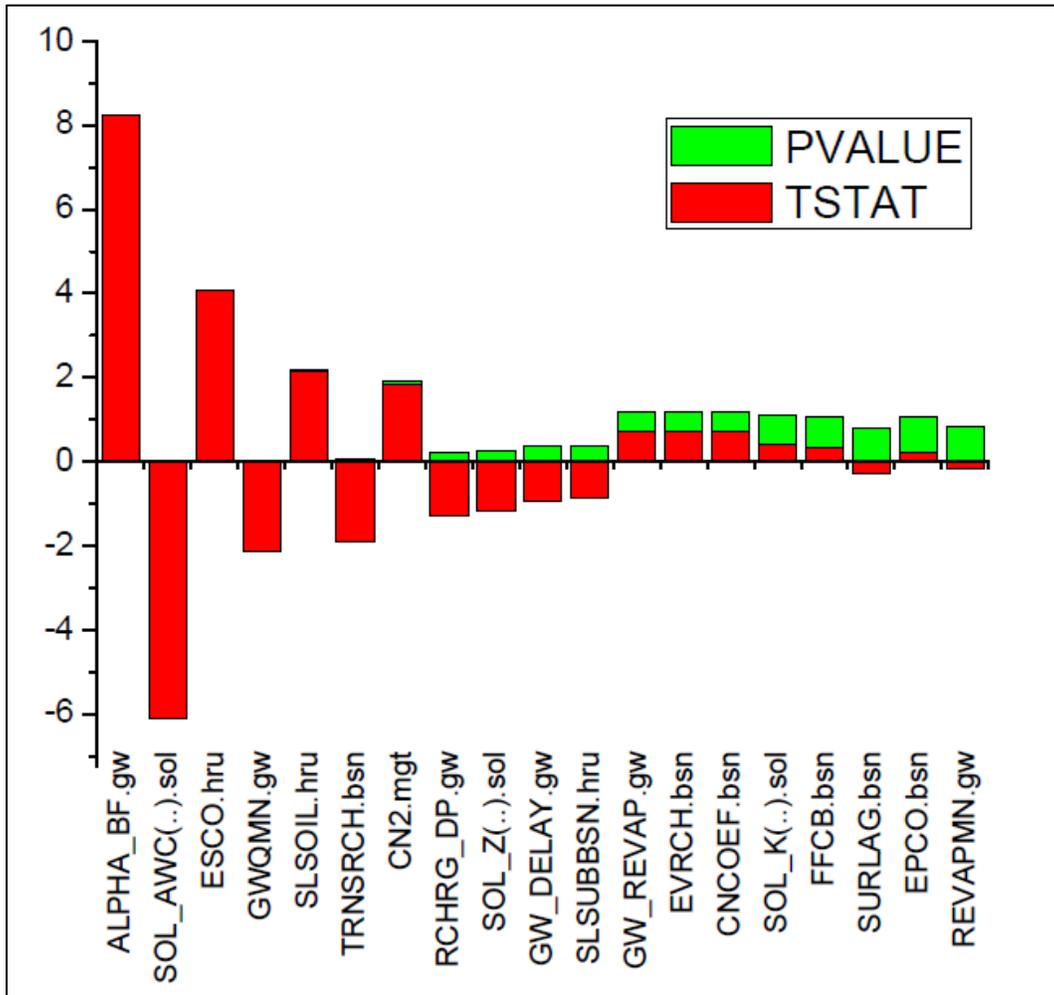


Figura A 4.15. Resultados del análisis de sensibilidad.