



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN

SOFTWARE DE MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE
AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROLÓGICAS.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

ING. JAVIER GONZÁLEZ LA NUEZ

CHIHUAHUA, CHIH.

DICIEMBRE 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN

SOFTWARE DE MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA
SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROLÓGICAS.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO EN MAESTRO DE INGENIERÍA

APROBADO:

Dr. Humberto Silva Hidalgo, director

M.I. David Maloof Flores, codirector

M.I. Norma Leticia Méndez Mariscal, sinodal

CHIHUAHUA, CHIH.

© Derechos Reservados

Javier González La Nuez

CIRCUITO UNIVERSITARIO,
CAMPUS II, CHIHUAHUA, CHIH.
MÉXICO

Diciembre, 2016

Copyright ©

por

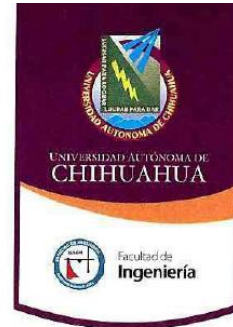
Ing. Javier González La Nuez

2016

13 de diciembre de 2016

ING. JAVIER GONZÁLEZ LA NUEZ

Presente



En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Humberto Silva Hidalgo** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“SOFTWARE DE MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROLÓGICAS”**.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ABSTRACT

RESUMEN

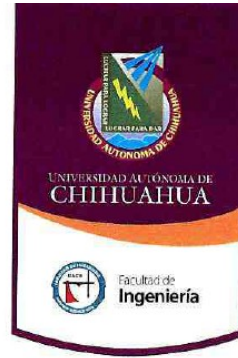
ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Planteamiento del problema
- 1.3 Pregunta de Investigación
- 1.4 Objetivos
- 1.5 Justificación
- 1.6 Hipótesis
- 1.7 Aportación práctica

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

- 2.1 Introducción
- 2.2 Cuencas
- 2.3 Sistemas de información geográfica (SIG)
- 2.4 Estimación conjunta de escurrimientos naturales, retornos de irrigación, ganancias y pérdidas, a lo largo de un tramo de río en una cuenca aforada
- 2.5 Modelo matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas



CAPÍTULO III. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

- 3.1 Introducción
- 3.2 Metodología objetivo específico 1
- 3.3 Metodología objetivo específico 2
- 3.4 Metodología objetivo específico 3

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

- 4.1 Introducción
- 4.2 Resultados del objetivo específico 1
- 4.3 Resultados del objetivo específico 2
- 4.4 Resultados del objetivo específico 3

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones
- 5.3 Trabajo a futuro

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.C.H.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. FERNANDO RAFAEL ASTORGA
BUSTILLOS

Dedicatoria

A mis hijos, motor impulsor para lograr cada una de mis metas.

Agradecimientos

Mi más sentido agradecimiento es para el M.I. David Maloof Flores, quien, como coordinador de la maestría, confió en mí y me dio la oportunidad de cursar este posgrado dando un importante giro a mi vida y que a la vez fue mi profesor y director de esta tesis.

Al Consejo de la Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por su apoyo económico en forma de becas, sosteniéndome durante estos dos años de estudios.

A la Secretaría de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por acogerme como alumno extranjero y asumir todos los retos que esto conlleva.

Especialmente a mi codirector, el Dr. Humberto Silva Hidalgo, que al ser de otra área del conocimiento, asumió el reto de guiarme en esta tesis mixta aportando su reconocida experiencia en la parte hidrológica, paciencia y dedicación como lo excelente profesional e investigador que es. Así como por la ayuda económica que a través de la facultad me brindó.

A mi asesora, la M.I. Norma Leticia Méndez Mariscal, por aceptarme y guiarme durante este período como estudiante.

A todos mis profesores de la maestría, por aportar sus conocimientos y enseñanzas para hacerme más profesional y alcanzar este logro.

A todos mis profesores de la Maestría que me enseñaron tanto de la profesión como de la vida, impulsándome y motivándome para seguir adelante.

A mis compañeros inseparables de semestre: Ingenieros Carlos Iván Ontiveros Roacho, Angel O. Flores Olivas y Miguel A. González Hidalgo, así como al resto de los estudiantes de la maestría que me acogieron con la mejor de las intenciones.

Muchas gracias a todos.

Abstract

Water is an essential factor for the life of all living beings on the planet. Its storage and proper use have been studied for decades around the world. Among this research is the doctoral thesis "Modelo Matemático para la Distribución de Agua Superficial en Cuencas Hidrológicas" conducted by Dr. Humberto Silva Hidalgo at the Center for Research in Advanced Materials, Chihuahua, Mexico; who provided a new method to measure water volumes based on historical information of natural runoff in watersheds. This model was implemented on Excel documents so, being handled large volumes of information, and it became tedious work for people who use it. Besides, other problems such as the possibility of duplicate information and existence of inconsistent data they were identified. In the format presented, Dr. Silva solution is vulnerable to change, affecting its dissemination. To solve this problem, the author of this paper develops a software product that implements the above mentioned mathematical model. It allows applying historical load calculations, design watershed techniques as "drag and drop" as well as the generation of statistical graphs in run time. Initially it studied software with similar functions as WEAP, HEC HMS, WRAP and River Ware. They brought him good ideas that helped in developing the new product. It was decided to use Microsoft Visual Studio for C # and the Drawing class, so that, the solution can be usable in most computer equipment.

Key words: watersheds, software, mathematical modeling

Resumen

El agua es un factor indispensable para la vida de todos los seres vivos en el planeta. Su almacenamiento y correcto aprovechamiento han sido objeto de estudios durante décadas. Entre estas investigaciones está la tesis doctoral: “Modelo Matemático para la Distribución de Agua Superficial en Cuencas Hidrológicas”, realizada por el Dr. Humberto Silva Hidalgo en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, de Chihuahua, México; quien aportó un nuevo método para medir los volúmenes de agua basado en la información histórica de los escurrimientos naturales en cuencas hidrológicas. Este modelo fue implementado sobre documentos Excel por lo que, al ser manejados grandes volúmenes de información, se convirtió en un trabajo tedioso para las personas que lo utilizan. Además, se identificaron otros problemas como la posibilidad de duplicado de información y existencia de datos incoherentes. En el formato presentado, la solución del Dr. Silva es vulnerable a modificaciones, afectando a su difusión. Para dar solución a dicha problemática, el autor de este trabajo desarrolla un software que implementa el mencionado modelo matemático. Permite la carga de históricos para aplicar los cálculos, el diseño de cuencas hidrográficas con técnicas de “arrastrar y soltar”, así como la generación de gráficas estadísticas. Inicialmente se estudiaron software con funciones semejantes como WEAP, HEC HMS, WRAP y River Ware; obteniendo buenas ideas que ayudaron en la elaboración del nuevo producto. Se decidió utilizar Microsoft Visual Studio para C# y la clase Drawing para que la solución pueda ser utilizable en la mayoría de los equipos de cómputo.

Palabras clave: cuencas hidrológicas, software, modelación matemática



Índice

DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
ABSTRACT	VIII
RESUMEN	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 <i>Antecedentes</i>	2
1.2 <i>Planteamiento del Problema</i>	12
1.3 <i>Pregunta de Investigación</i>	13
1.4 <i>Objetivos</i>	13
1.5 <i>Justificación</i>	14
1.6 <i>Hipótesis</i>	16
1.7 <i>Aportación práctica</i>	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 <i>Introducción</i>	19
2.2 <i>Cuencas</i>	19
2.3 <i>Sistemas de información geográfica (SIG)</i>	25
2.4 <i>Estimación conjunta de escurrimientos naturales, retornos de irrigación, ganancias y pérdidas, a lo largo de un tramo de río en una cuenca aforada</i>	26



2.5	<i>Modelo matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas.....</i>	29
CAPÍTULO III. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS		38
3.1	<i>Introducción</i>	39
3.2	<i>Metodología Objetivo Especifico 1.....</i>	39
3.3	<i>Metodología Objetivo Especifico 2.....</i>	40
3.4	<i>Metodología Objetivo Especifico 3.....</i>	41
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		43
4.1	<i>Introducción</i>	44
4.2	<i>Resultados del Objetivo específico 1.</i>	44
4.3	<i>Resultados del Objetivo específico 2.</i>	48
4.4	<i>Resultados del Objetivo específico 3.</i>	63
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		69
5.1	<i>Conclusiones.....</i>	70
5.2	<i>Recomendaciones.....</i>	71
5.3	<i>Trabajo a futuro</i>	71
BIBLIOGRAFÍA		72
ANEXOS.....		75



Índice de Figuras

<i>Figura 1: Ejemplo de diagrama WEAP</i>	5
<i>Figura 2: Representación de una cuenca (CSERC, n.d.)</i>	20
<i>Figura 3: Cuenca de cabecera sin embalse (“Oregon Hikers • View topic - Another Goat Rocks report 8.13-14.2010,” 2008)</i>	22
<i>Figura 4: Cuenca sin embalse (“Protecting Watersheds - Western Watersheds Project,” n.d.)</i>	23
<i>Figura 5: Cuenca con embalse (U.S. Department Of The Interior, n.d.)</i>	24
<i>Figura 6: Capas representadas en un SIG</i>	26
<i>Figura 7: Ganancias de agua por actividades socio-económicas (IST-CI, 2015)</i>	28
<i>Figura 8: Esguimiento natural (University of Hertfordshire, 2011)</i>	29
<i>Figura 9: Cuenca sin almacenamientos de agua superficial (Silva Hidalgo, 2010)</i>	30
<i>Figura 10: Cuenca con un almacenamiento de agua superficial (embalse natural o artificial) en el extremo aguas abajo del tramo de cauce (Silva Hidalgo, 2010)</i>	35
<i>Figura 11: Cuenca con un almacenamiento de agua superficial (embalse natural o artificial) en un punto intermedio de un tramo de cauce (Silva Hidalgo, 2010).</i>	37
<i>Figura 12: Metodología Objetivo Especifico 1</i>	40
<i>Figura 13: Metodología Objetivo Especifico 2</i>	41
<i>Figura 14: Metodología Objetivo Especifico 3</i>	42
<i>Figura 15: Prototipo no funcional de interfaz principal</i>	48
<i>Figura 16: Seleccionar el tipo de cuenca</i>	49
<i>Figura 17: Carga de imagen de fondo</i>	50



<i>Figura 18: Inserción de elementos del diseño.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19: Eliminar elemento e invertir sentido del cause.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 20: Movimiento de elementos.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 21: Cambio de tamaño de los elementos</i>	<i>51</i>
<i>Figura 22: Color y grosor de los elementos</i>	<i>52</i>
<i>Figura 23: Auto propuesta de diseño al seleccionar el tipo de cuenca</i>	<i>53</i>
<i>Figura 24: Entrada de datos al sistema</i>	<i>54</i>
<i>Figura 25: Formato vacío para poner los registros históricos</i>	<i>55</i>
<i>Figura 26: Salidas del sistema</i>	<i>56</i>
<i>Figura 27: Mensaje de advertencia de cambios en el proyecto.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 28: Error de colocación de elementos demasiado cerca.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 29: Error de validación de datos del formulario</i>	<i>58</i>
<i>Figura 30: Hidrograma</i>	<i>60</i>
<i>Figura 31: Tabla de escurrimientos naturales</i>	<i>60</i>
<i>Figura 32: Persistencia en el tiempo de los proyectos.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 33: Contenido de archivo XML.....</i>	<i>62</i>



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN



1.1 Antecedentes

A raíz de los problemas existentes es realizado un proyecto científico por el Dr. Humberto Silva Hidalgo de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), quién diseñó un modelo matemático para la determinación conjunta de escurrimientos naturales, retornos de irrigación y volúmenes de pérdidas y ganancias de agua en cuencas (Silva-Hidalgo, 2010). Con esta modelación son corregidos muchos errores de estudios anteriores y también se tienen en cuenta los diferentes casos que pudieran afectar el resultado volumétrico real de la cuenca en cuestión, arrojando valores que se pueden considerar como óptimos. Este trabajo ha tenido gran aceptación por la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, y ha influido positivamente en el trabajo hidrológico en México, lo cual se referencia en el informe técnico “Determinación conjunta de escurrimientos naturales restituidos, retornos de irrigación y volumen neto de pérdidas y ganancias en la cuenca del río Bravo (parte mexicana), para el periodo de 1950 al año 2008” (Silva Hidalgo, López Corzo, García Servín, & Verduzco Cedeño, 2014).

Actualmente, CONAGUA realiza el control de los datos históricos de medición de aguas sobre documentos Microsoft Excel, lo que constituye un trabajo muy tedioso para las personas que se relacionan con los mismos. Errores de entrada de datos, demasiada complejidad para el entendimiento por parte del personal que labora y numerosas hojas Excel sobre las cuales hay que trabajar para obtener el resultado requerido; son de las causas que provocan que la solución informática que existe hasta el momento sea poco funcional para usuarios no expertos.

De las dificultades anteriormente expuestas surge la necesidad de existencia de un software para llevar el control de los datos necesarios y la realización de los cálculos propuestos por la modelación matemática previamente mencionada. Este software debe presentar una interfaz gráfica basada en SIG (Sistemas de Información Geográfica) que permita el diseño de cuencas hidrográficas a partir de los elementos que las componen y sus respectivas relaciones e información.



1.1.1 Software o soluciones informáticas semejantes

1. WEAP

Existen soluciones informáticas relacionadas a esta temática como el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua o WEAP (Water Evaluation and Planning, por sus siglas en inglés) desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo y cuya información se encuentra en www.weap21.org. WEAP ha sido utilizado en diferentes investigaciones para la planificación y distribución de agua (B.J.M Goes, S.E. Howarth, R.B. Wardlaw, I.R. Hancock, & U.N. Parajuli, 2015) (Chandra Nayak, Wardlaw, & Kharya, 2015) (Matchett, Fleskes, Young, & Purkey, 2015) (Karlberg, et al., 2015) (Njeri Ngugi, 2015).

WEAP se enfoca en la demanda de agua, identifica patrones de uso del agua, eficiencias de equipos hidráulicos, estrategias de reúso, costos, y esquemas de asignación del agua. Calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua. Además, de la generación, tratamiento, descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas. También simula componentes naturales como demandas por evapotranspiración y escorrentía¹; así como los de infraestructura ya sean embalses o bombeo de agua subterránea.

¹ Lámina de agua que corre por la superficie luego de la ocurrencia de lluvia, a la que se le resta la parte evaporada y la drenada por el suelo. Es dada en milímetros.



WEAP brinda una interfaz gráfica basada en SIG, donde el usuario diseña el esquema del sistema deseado arrastrando y soltando los elementos a ser agregados al sistema. El diseño es superpuesto sobre un mapa construido en Arcview² y otros archivos de SIG estándar y gráficos. Los datos o propiedades de cada componente pueden ser editados haciendo clic derecho sobre su símbolo en el esquema. Admite ocultar y volver a mostrar elementos ya ubicados en el diseño. La ayuda puede ser consultada desde cualquier lugar. Cuenta con un sistema de avisos, advertencias y tratamiento de errores. Tiene un conjunto personalizable de reportes cuyos resultados pueden ser mostrados en gráficos, tablas o mapas así como seleccionar las unidades de medidas deseadas. Permite guardar configuraciones preferidas de reportes para ser reutilizadas con otros datos. Da la posibilidad al usuario de cambiar el lenguaje de la aplicación. WEAP es una solución informática diseñada para el uso de una persona a la vez. Es adquirida en forma de instalación y de fácil configuración. Un ejemplo se puede apreciar en la Figura 1.

² Software SIG para datos espaciales y elaboración de mapas.

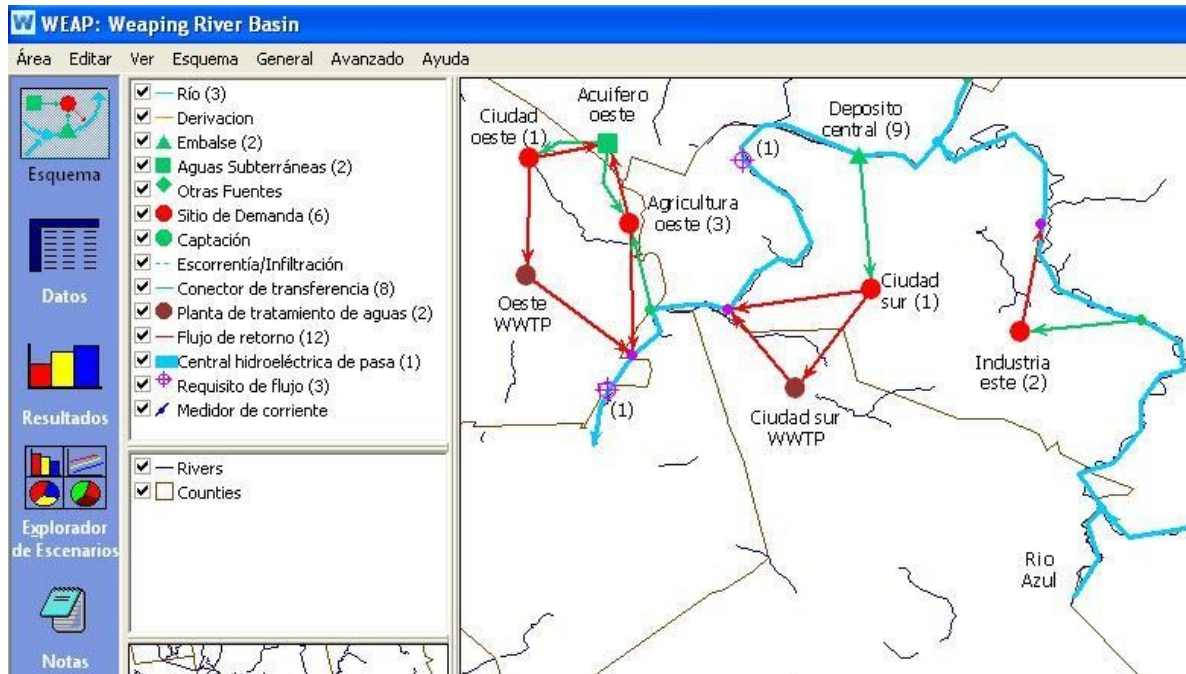


Figura 1: Ejemplo de diagrama WEAP

WEAP fue utilizado en México de 1993 a 1994 en una evaluación integrada de recursos hídricos de la cuenca del Río San Juan, incluyendo el centro industrial de Monterrey: Agua y Medio Ambiente en el Río San Juan (Quentin). El estudio incluyó el desarrollo de un equilibrio entre oferta y demanda de la cuenca, y la identificación de las estrategias de desarrollo alternativo de agua y sus implicaciones ambientales³.

Otra aplicación de WEAP ocurrió entre 1997 y 2009 en California permitiendo un marco para los gestores del agua, a los legisladores y al público a considerar opciones y tomar decisiones sobre el futuro del agua en este estado. Dicho plan identifica y evalúa

³ Esta información puede ser consultada desde la página web de la siguiente url:
<http://www.weap21.org/index.asp?action=205&all=1>



la gestión de la demanda estatalmente vigente y propuesta, así como programas de aumento de suministro de agua y proyectos para atender las necesidades de agua en la zona. Además, se utiliza para llevar a cabo el análisis de escenarios integrados, en el que las diversas estrategias de gestión se evalúan en el contexto de un rango de incertidumbre en relación con las tendencias futuras de la demanda de agua y el clima.

También en Brasil se utilizó para la Cuenca del Río San Francisco entre 2004 y 2008 planificando y evaluando conjuntos de pequeños embalses multipropósito para la mejora de los medios de vida de pequeños productores y la seguridad alimentaria. Este proyecto consistió en trabajar en la Cuenca del Río San Francisco (Brasil), la cuenca del río Volta (Ghana), y la Cuenca del Río Limpopo (África del Sur) con el mismo propósito. Decenas de miles de comunidades rurales en África y América Latina se basan en el agua de pequeños reservorios polivalentes para sus hogares, ganado y sistemas de riego. Basándose en este fundamento, la toma de decisiones en la cuenca y la escala nacional, junto con las comunidades locales, permite garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los suministros locales de agua y caudales aguas abajo adecuados.

2. HEC-HMS

Otro software con características parecidas es el Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-HMS, Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)⁴ simula los procesos hidrológicos completos de

⁴ Su sitio en internet es <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.



sistemas de cuencas dendríticas⁵. Ha sido utilizado en numerosos trabajos investigativos (NA, Shah Alam, PM, ARA, & ZM, 2014) (Suk-Hwan & Sun-Woong, 2012) (Ashok, Chandranath, Prachi Pratyasha, R, & Arun, 2015). Este software incluye muchos procedimientos de análisis hidrológicos tradicionales tales como la infiltración, hidrogramas unitarios y el enrutamiento hidrológico. HEC-HMS también incluye los procedimientos necesarios para la simulación continua incluyendo la evapotranspiración, la fusión de la nieve, y la contabilidad de la humedad del suelo. Presenta facilidades para los análisis suplementarios que se proporcionan para la estimación de parámetros, un análisis a fondo de la zona, el flujo de pronóstico, erosión y transporte de sedimentos, nutrientes y la calidad del agua.

HEC-HMS cuenta con un entorno de trabajo que incluye una base de datos, los servicios públicos de entrada de datos, motor de cálculo, y los resultados de herramientas de informes. Además, tiene una interfaz gráfica que permite la interacción fluida del usuario entre las diferentes partes del software. Los resultados de la simulación se almacenan en HEC-DSS (sistema de almacenamiento de datos o Data Storage System por sus siglas en inglés) y se pueden utilizar en conjunción con otro software para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, la previsión de flujo, el futuro impacto de urbanización, diseño aliviadero del embalse, la reducción de daños por inundaciones, regulación de llanura de inundación y operación de los sistemas.

⁵ Prolongaciones o ramificaciones en forma de árbol. Son ríos a los cuales se le unen otros ríos de menor caudal o riachuelos formando una cuenca en forma parecida al sistema de arterias y venas que distribuyen la sangre en el cuerpo humano.



HEC-HMS brinda diferentes métodos para simular pérdidas por infiltración. Para el modelado se incluyen constante inicial, número de curva SCS⁶ y exponencial. Métodos reticulares están disponibles tales como Verde Ampt, número de curva SCS, y métodos de contabilidad de humedad del suelo. Componentes Canopy y de superficie también se pueden añadir cuando sea necesario para representar procesos de intercepción y captura.

Siete métodos se incluyen para la transformación de exceso de precipitación en escorrentía superficial. Los métodos de hidrograma unitario incluidos son el Clark, Snyder y técnicas SCS. También se pueden utilizar la unidad de hidrograma especificada por el usuario o gráfico de coordenadas. El método de Clark modificado (ModClark), es un método hidrograma lineal que se puede utilizar con datos meteorológicos cuadrículados. Además, se incluye un método de aplicación de la onda cinemática con múltiples planos y canales.

HEC-HMS utiliza cinco métodos para representar contribuciones de caudal base a sub-cuenca de salida. El método recesión da un caudal base exponencialmente decreciente de un solo evento o varios eventos secuenciales. El método mensual constante puede trabajar bien para simulación continua. El de depósito lineal conserva en masa por precipitación de enrutamiento se infiltró en el canal. Otro método es Boussinesq no lineal que ofrece una respuesta similar al método de la recesión, pero los parámetros pueden estimarse a partir de cualidades medibles de la cuenca.

⁶ El número de la curva (también llamado un número de curva o simplemente CN) es un parámetro empírico utilizado en hidrología para predecir la escorrentía directa o infiltración por las fuertes lluvias. Es ampliamente utilizado y eficiente para la determinación de la cantidad aproximada de escurrimiento directo de un evento de lluvia en un área particular.



HEC-HMS incluye un total de seis métodos de enrutamiento hidrológicos para simular el flujo en canales abiertos. Enrutamiento sin atenuación se puede modelar con el método lag. El método tradicional Muskingum se incluye junto con el método de escalonamiento de montar a horcajadas para aproximaciones simples de atenuación. El Puls modificado puede ser usado para modelar un alcance como una serie de piscinas en cascada, de nivel con una relación de almacenamiento de descarga especificado por el usuario.

Los canales con forma trapezoidal, rectangular, triangular o de sección circular se pueden modelar con la onda cinemática o métodos de Muskingum-Cunge. Los de zonas de desbordamiento se pueden modelar con el método Muskingum-Cunge también y una sección transversal de 8 puntos. Además, las pérdidas de los canales también pueden ser incluidos en el enrutamiento. El método de pérdida constante puede ser añadido a cualquier método de enrutamiento mientras que el método de percolación solo se puede utilizar con los métodos Puls o Muskingum-Cunge modificados.

HEC-HMS también puede representar embalses de agua. Los lagos se describen generalmente por una relación de almacenamiento de descarga introducida por el usuario. Los embalses se pueden simular mediante la descripción de las estructuras de aforo y de salida físicos. Además, se incluyen, según sea necesario para simular, una zona inundable interior. El control de las bombas puede estar vinculado a la profundidad del agua en el estanque de recogida y, opcionalmente, la etapa en el canal principal. Estructuras de derivación también pueden ser representadas. Los métodos disponibles incluyen una función definida por el usuario, vertedero lateral, estación de bombeo, los flujos de desviación observados.

3. WRAP



Además, fueron estudiadas las características del Water Rights Analysis Package (WRAP)⁷. Es un sistema de modelado que a través de un software o programa informático realiza el procesamiento de archivos de entrada de cuenca para cada cuenca hidrográfica de Texas.

WRAP simula la gestión de los recursos hídricos de una cuenca o región de múltiples cuencas bajo un sistema de asignación del agua basada en prioridades. El modelo facilita la evaluación de la disponibilidad de agua hidrológica e institucional y la fiabilidad de los requisitos de uso de agua especificada. Permite evaluar los impactos de los proyectos de desarrollo de recursos hídricos y las estrategias de gestión en toda la cuenca. El paquete de software es generalizado para su aplicación a cualquier sistema de río / embalse, con archivos de entrada que están desarrollados para la cuenca hidrográfica en cuestión.

WRAP está muy bien documentado mediante referencias y manuales de usuario, un manual de fundamentos de introducción y otros manuales que cubren aspectos específicos del sistema de modelado. Presenta su versión más actualizada y los manuales pueden descargarse desde las direcciones de Internet antes plasmadas. También se brindan un conjunto de archivos de entrada para los ejemplos en los manuales y una descripción de las modificaciones reflejadas en varias versiones del modelo. Los manuales también están disponibles junto con otros informes técnicos

⁷ Entre sus principales fuentes que proporcionan información desde Internet están http://www.tceq.state.tx.us/permitting/water_rights/wam.html y <https://ceprofs.civil.tamu.edu/rwurbs/wrap.htm>.



citados en los manuales en el sitio web del Instituto de Recursos Hídricos de Texas (TWRI, por sus siglas en inglés).

WRAP está validado por la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (TCEQ) para el Modelado de Disponibilidad de Agua (WAM) del sistema. Las bases de datos del sistema WAM para las cuencas de Texas y la información relacionada se pueden acceder a través del sitio web de la TCEQ WAM. Además, se puede descargar desde este sitio un examen comparativo de los sistemas de modelado, manejo de yacimientos / río generalizados incluyendo WRAP y otros modelos. Se presenta un informe que está diseñado para ayudar a los profesionales en la selección y aplicación de modelos generalizados en diversas situaciones y de apoyo a los continuos esfuerzos de investigación y desarrollo en la mejora de las capacidades de modelado.

Después del estudio de estos programas informáticos se llegó a la conclusión de que fuesen descartados como soluciones del trabajo. Estos software no calculan los volúmenes de agua en cuencas hidrológicas desde la perspectiva presentada por el Dr. Silva, es decir, que no toman en cuenta las pérdidas y ganancias reales de las mismas, lo cual conlleva a resultados irreales o negativos en determinadas situaciones. Para poder considerarlas se necesitarían modificaciones a sus funcionalidades o programación adicional lo cual se haría engorroso ya que no son de código abierto y solo pueden ser modificadas por sus fabricantes. Sin embargo, son muy buenas y resuelven problemas reales con respecto a satisfacer las demandas del preciado líquido para cualquier asentamiento o población; ayudan a la toma de decisiones basándose en estadísticas.

El estudio anterior ayudó mucho a esta investigación aportando una serie de ideas y herramientas útiles para la elaboración o diseño gráfico de elementos o componentes hídricos y algunas técnicas para una mejor interacción del usuario con la solución. Trabajan a partir de información histórica para la realización de cálculos y predicciones



utilizando archivos con información presentados por el usuario. Presentan diferentes formas de divulgación de la información así como políticas de privacidad y de uso. Aportan distintas maneras de configuración o personalización flexible para el usuario como las modificaciones de unidades de medidas, escalas, dimensiones y colores en los que desea ver su diseño de cuenca y gráficas resultantes así como la cantidad de información a mostrar.

Una vez analizados estos software similares, descartados e identificadas las características que pueden ayudar a la solución del problema, se decide desarrollar un software o aplicación desde cero que se ajuste perfectamente a las necesidades existentes según el modelo matemático planteado por el Dr. Silva para lograr una eficiente determinación conjunta de escurrimientos naturales, retornos de irrigación y volúmenes de pérdidas y ganancias en cuencas hidrográficas.

1.2 Planteamiento del Problema

El agua es el recurso natural de mayor valor vital después del oxígeno, cuya escasez podría ser motivo de grandes conflictos entre personas e incluso entre naciones. De ahí la importancia de hacer tantas investigaciones como sean posibles con el fin de aprovechar las cuencas hidrológicas de cada territorio. Alrededor del mundo existen países que dedican recursos considerables a este aspecto, como es el caso de EEUU, que incluso lo administra a nivel militar. En el caso de México también es una prioridad nacional, tanto así que existe organizaciones gubernamentales dedicadas al uso racional del agua. También se cuenta con mucho apoyo financiero por parte de CONACYT para proyectos científicos de esta índole. Actualmente, CONAGUA en el estado de Chihuahua realiza el control de los datos históricos de medición de aguas sobre documentos Microsoft Excel, según propuso el Dr. Silva (autor del modelado matemático). Esto conlleva a un trabajo muy minucioso para las personas no expertas, que se relacionan



con los mismos. Errores de entrada de datos, posibilidad de duplicación de información, incoherencia, demasiada complejidad para el entendimiento por parte del personal que labora y numerosas hojas Excel sobre las cuales hay que trabajar para obtener el resultado requerido; son de las causas que provocan que la solución informática que existe hasta el momento no funciona eficientemente y es susceptible de automatizarse. A demás para su autor resulta difícil su distribución por problemas de plagio o piratería.

1.3 Pregunta de Investigación

¿Cómo minimizar posibles errores que, como consecuencia del uso de Excel, limitan la eficiencia en los cálculos y la correcta aplicación del modelado matemático del Dr. Silva?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un software, que implemente la modelación matemática propuesta por el Dr. Silva, para calcular la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Realizar el análisis y diseño del software deseado.
2. Implementar la solución propuesta.
3. Evaluar la calidad del software.



1.5 Justificación

Con la elaboración de este software se obtendrá una herramienta muy útil para las personas dedicadas a la toma de decisiones en cuanto al uso racional, correcta distribución y explotación del agua que se genera por efecto de precipitación en las cuencas hidrográficas naturales.

1.5.1 Datos de entrada

Capacitado para brindar la opción en cuanto a la entrada de datos históricos, al reconocer documentos Excel del paquete de Microsoft Office, se adaptará a los archivos donde actualmente es guardada la información o datos reales. Estos datos serán validados para la identificación de errores evitando la inconsistencia, réplica, incoherencia, déficit o exceso de datos en las entradas y así lograr los análisis y resultados óptimos esperados. En caso de encontrar alguno de los defectos de la información el usuario será informado sobre lo ocurrido y cómo proceder para lograr una exitosa entrada de la información.

1.5.2 Interacción humano-computadora

Con interfaces gráficas que mejoran la visión, análisis y búsquedas de información presentará una amigable mejora a la interacción del usuario con la aplicación facilitándole el trabajo al mismo. Contará con un sistema gráfico para la elaboración o diseño de cuencas hidrográficas según el trabajo que desee realizar el usuario y que corresponda con la entrada de datos aportada. Contará con un sistema de íconos o símbolos así como sus relaciones que representan los elementos que componen las cuencas. Realizará los cálculos para la determinación conjunta de escurrimientos naturales, retornos de



irrigación y volúmenes de pérdidas y ganancias a través del modelo matemático elaborado por el Dr. Silva.

Una estrategia de multilinguaje le será incorporada para una mejor comprensión y mayor utilización internacionalmente, presentando como idiomas iniciales al inglés y el español así como la posibilidad que tendrá el usuario de incorporar nuevos idiomas según su preferencia.

1.5.3 Datos de salida

Los resultados serán mostrados en diferentes formatos como Excel y gráficas estadísticas. Estas salidas pueden ser configuradas por el usuario quien tendrá la posibilidad de cambiar unidades de medidas, cantidades de información, colores y otros parámetros hasta obtener la salida esperada según el análisis que desee realizar.

1.5.4 Hardware

El software a implantar necesitará pocas prestaciones de hardware permitiendo su uso en prácticamente cualquier equipo de cómputo por muy antiguo que sea, ampliando aún más sus posibilidades de uso.



1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

Con el desarrollo de un software a la medida para la modelación matemática del Dr. Silva, se obtendrá una solución distribuible de forma segura, amigable y con una correcta validación de datos de entrada.

1.6.2 Hipótesis Específicas

1. Una vez analizado a fondo y diseñado el software a la medida, se contará con una base sólida para comenzar a implementarlo.
2. Con la implementación de la solución propuesta, ya no será necesario calcular la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas mediante documentos Excel.
3. El software será robusto, eficiente y amigable cuando se le apliquen correctamente las pruebas correspondientes y se corrijan los errores encontrados.
4. Brindándole atención al cliente, con capacitaciones y escuchando opiniones; se logrará una solución adecuada a las necesidades del mismo.

1.7 Aportación práctica

Una vez desarrollada esta solución se resolvería el problema planteado en este trabajo. Los cálculos que actualmente se realizan en documentos Excel y sus respectivas consecuencias como posibilidad de errores y trabajo engorroso serán remplazados. Se podrá difundir la solución para ser utilizada en cualquier parte del mundo y así contribuir



a la preservación y racionalización del agua, el cual es un recurso natural muy importante y vital para la existencia de los seres vivos del planeta.

Este producto servirá de gran apoyo legal para cualquier nación corrigiendo los errores de medición de volúmenes de agua como por ejemplo los dictados por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002) y la del estado de Texas, E.U.A. (TNRCC, 1997; TNRCC, 1998 y Wurbs, 2006); las cuales en ausencia de medición de flujos de retorno y de volúmenes perdidos en cauces obtienen valores negativos, lo cual implica cantidades de volúmenes de agua físicamente imposibles (flujos negativos). Siendo así podrían ser corregidas las normas en cuanto a las medidas de volúmenes de agua en las naciones que ya cuentan con estas leyes e incluso ayudar a una mejor elaboración de las mismas para las que aún no las tienen establecidas.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO



2.1 Introducción.

El marco teórico de este trabajo fue elaborado con el objetivo de adentrar al lector en algunos aspectos técnicos para apoyar la comprensión del contenido en general. Se hace un bosquejo acerca de qué es una cuenca, las partes que la conforman, sus límites y tipos de cuencas definidos en este trabajo para los cálculos. Además, se explica el concepto de SIG (Sistema de Información Geográfica) y otros conceptos de términos más específicos como retorno de irrigación, escurrimiento natural, pérdidas y ganancias; así como su determinación conjunta. Finalmente se dan a conocer las fórmulas principales, diseñadas por el Dr. Silva, para los cálculos; que dan sustento matemático a los resultados arrojados por el software.

2.2 Cuencas

Las cuencas constituyen áreas de la tierra a través de las cuales fluye y drena el agua de las precipitaciones que caen sobre sus superficies, como efecto de la fuerza de gravedad. Abarcan terrenos, arroyos, riachuelos, ríos, lagos y demás elementos naturales que, sumados a obras ingenieriles a fines, van a parar a una salida común como puede ser una desembocadura al mar. También son conocidas como cuencas de drenaje. Estas comienzan y son delimitadas entre ellas por las crestas, montañas, colinas u otros elementos naturales cuya superficie alcance el punto más alto; convirtiéndolas en cuencas adyacentes (“Watersheds and drainage basins, USGS Water Science School,” n.d.).

Es común que las personas al referirse a una cuenta piensen que es un río o presa, sin embargo, estos son solo una parte de la cuenca o sub-cuenca, la cual está formada por todo el terreno que drene agua a sus alrededores ya sea de manera superficial, sub-superficial o subterránea. Las cuencas grandes se pueden dividir en sub-

cuencas para un mejor análisis y aprovechamiento. En la Figura 2 es posible apreciar una representación gráfica de una cuenca y sus principales partes.

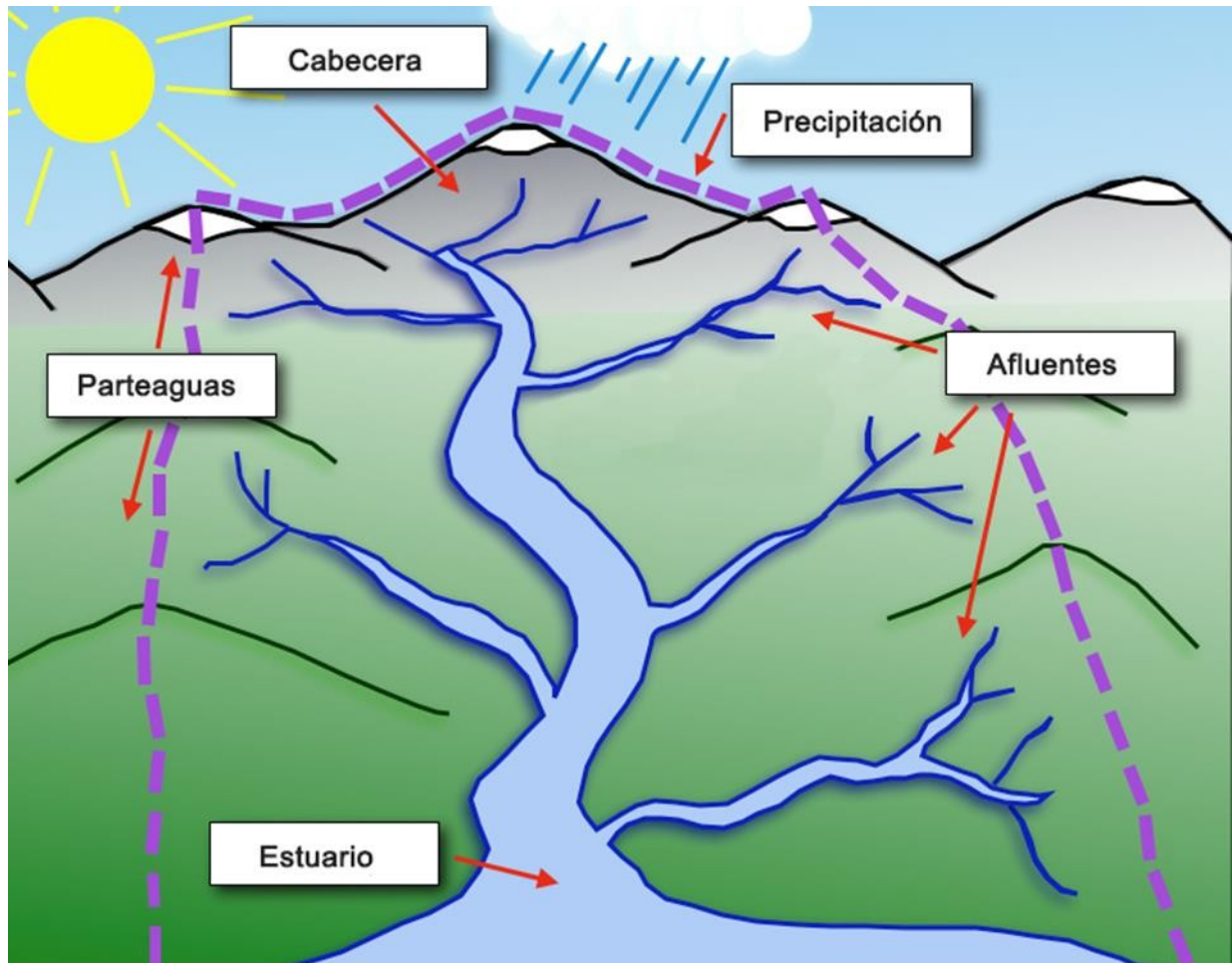


Figura 2: Representación de una cuenca (CSERC, n.d.)



2.2.1 Tipos de cuencas

A los efectos de este trabajo existen varios tipos de cuencas o sub-cuencas, cada una de las cuales recibe un tratamiento matemático diferente así como cantidades de variables a manejar y son descritas a continuación:

➤ **Cuencas de cabecera**

Las cabeceras de cuencas son el inicio de toda cuenca. Se encuentran en el área que comienza en el punto más alto de la superficie (parteaguas). Se caracterizan por no contar con una sub-cuenca anterior, por lo que matemáticamente hablando la variable aguas arriba (A_r) valdría 0. A través de ellas solo fluye el agua superficial, sub-superficial y subterránea producida por las precipitaciones sobre su área.

Toda esta agua a lo largo de esta porción de cuenca se va uniendo y acumulando formando un río con el caudal suficiente como para colocar un punto de medición. Es en este punto donde culmina la cuenca de cabecera. Este punto de medición puede ser tanto una simple estación hidrométrica que constantemente está midiendo el agua que pasa por ella, como una presa o embalse, ya sea natural o construida por el hombre, desde la que también se mide el agua que sale de ella. Lo anteriormente descrito significa que este tipo de cuencas solo cuentan con un punto de medición y este se encuentra aguas abajo que representa la variable (A_b). Dependiendo de la existencia, al final de la sub-cuenca, de un embalse o no, se clasifica como cuenca de cabecera con embalse o cuenca de cabecera sin embalse (Figura 3).

También existe la posibilidad de que anterior al punto de medición aguas abajo existan otros embalses de reciente creación en los cuales no existan registros antiguos. Estos embalses pudieran afectar los cálculos en caso de ser tomados como puntos de

medición, por lo que se decide recoger sólo el dato de la evaporación del agua que ocurre en ellos. Siendo así, aparecen dos nuevos tipos de cuencas, que al igual que los dos anteriores depende de si terminan en embalse o punto de medición: cabecera con embalses intermedios y cabecera con embalse y embalses intermedios.



Figura 3: Cuenca de cabecera sin embalse (“Oregon Hikers • View topic - Another Goat Rocks report 8.13-14.2010,” 2008)

➤ **Cuencas intermedias**

Las cuencas intermedias son sub-cuencas que no clasifican en la categoría de cabeceras. Están precedidas por sub-cuencas aguas arriba; lo que implica que, además de ser alimentadas por el agua que fluye en el área que abarcan, tienen una entrada de aguas arriba (Ar). En todos los casos excepto en el de cabeceras la variable Ar de una sub-cuenca tiene el mismo valor numérico que la de Ab de la anterior. Esto significa que dada la continuidad entre sub-cuencas pertenecientes a la misma cuenca, la salida de una es la entrada de la siguiente, o la entrada de una es la salida de la anterior. Este tipo

de cuenca se caracteriza por tener dos puntos de medición (al inicio que arroja Ar y al final con Ab). Pueden o no presentar embalses a lo largo de su extensión. Un ejemplo de se puede observar en la Figura 4.



Figura 4: Cuenca sin embalse (“Protecting Watersheds - Western Watersheds Project,” n.d.)

Las cuencas intermedias con embalses presentan las características de las anteriores pero, como su nombre lo indica, tienen una o varias presas o embalses en algún punto de su extensión. En dependencia de donde se encuentre el embalse dentro de la sub-cuenca se clasifican de tres maneras. Si solo tiene un embalse al final del tramo (Ab), se denominan cuencas con embalse. Las cuencas con embalses intermedios son aquellas cuyos embalses no forma parte de su extremo aguas abajo. Las cuencas con embalse y embalses intermedios son las que presentan embalses intermedios y además en su extremo aguas abajo.



Figura 5: Cuenca con embalse (U.S. Department Of The Interior, n.d.)



2.3 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990). Los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en la última década en herramientas de trabajo esenciales en el planeamiento urbano y en la gestión de recursos. Su capacidad para almacenar, recuperar, analizar, modelar y representar amplias extensiones de terreno con enormes volúmenes de datos espaciales les han situado a la cabeza de una gran cantidad de aplicaciones.

Los Sistemas de Información Geográfica se utilizan actualmente en la planificación de los usos del suelo, gestión de servicios, modelado de ecosistemas, valoración y planificación del paisaje, planificación del transporte y de las infraestructuras, marketing, análisis de impactos visuales, gestión de infraestructuras, asignación de impuestos, análisis de inmuebles y otras muchas. Entre sus funcionalidades se encuentran la entrada, visualización, gestión, recuperación y análisis de información.

Una forma más general y fácil de definir los SIG es la que considera la disposición en capas de sus conjuntos de datos que se muestra en la Figura 6. Se conocen como una serie de mapas de la misma porción del territorio, donde la localización de un punto tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos en el sistema. De esta forma, es posible analizar sus características temáticas y espaciales para obtener un mejor conocimiento de la zona.

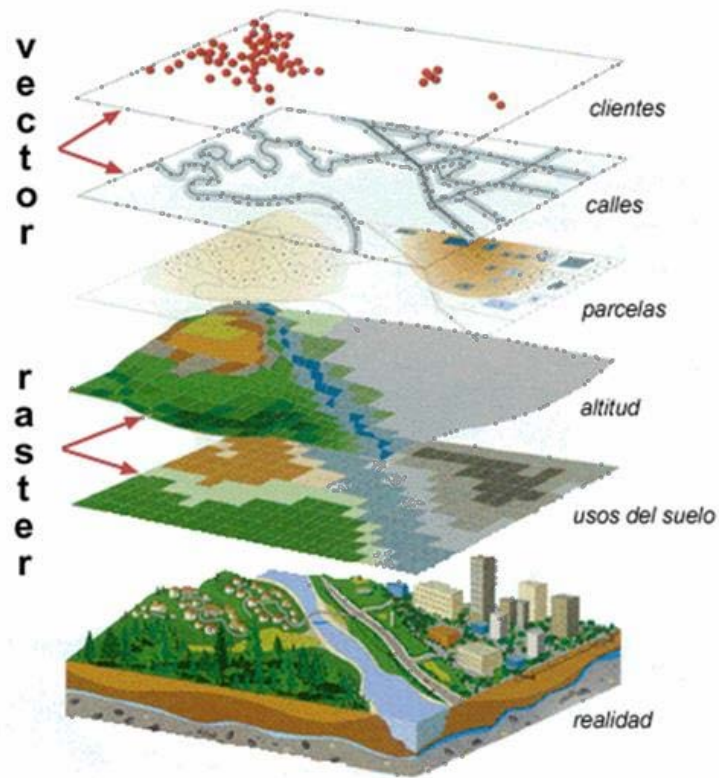


Figura 6: Capas representadas en un SIG

2.4 Estimación conjunta de escurrimientos naturales, retornos de irrigación, ganancias y pérdidas, a lo largo de un tramo de río en una cuenca aforada.

Normalmente en un sistema río-presa de una cuenca, el cauce natural del río es utilizado como medio para hacer que el agua fluya hasta los sitios aguas abajo. Una parte del agua enviada es perdida mientras fluye debido a factores naturales del río como la



evapotranspiración e infiltración, así como a otros provocados por el hombre como extracciones no autorizadas; la cuales no son contabilizadas (Silva-Hidalgo, 2010).

Al mismo tiempo que ocurren pérdidas de agua también es posible la ocurrencia de ganancias o contribuciones diferentes al escurrimiento natural⁸. Ejemplo de estas aportaciones se encuentran en las originadas por el escurrimiento sub-superficial que ocurre en temporada húmeda durante las precipitaciones; fluyendo a través del sub-suelo hasta los afluentes de los ríos. También existen entradas de agua cuando el nivel freático es superior al de las aguas del cauce de la cuenca, provocando un ingreso de agua subterránea o flujo base.

Por otro lado pueden existir aportaciones de agua como los retornos de aguas en ciudades, tanto crudas como tratadas, de las industrias o agricultura; como se aprecia en la Figura 7. Esta última es conocida como retorno de irrigación. Consiste en que al utilizar agua del cauce de una cuenca para regar sembrados (pérdida) que se encuentren dentro de la superficie de la misma cuenca; parte de esta agua utilizada regresa al cause mediante el sub-suelo (ganancia) de la misma manera que el escurrimiento sub-superficial. A diferencia de los demás tipos de ganancia, es muy difícil de cuantificar (Silva Hidalgo, 2010).

⁸ Porción del agua causada por precipitaciones que fluye por la superficie natural o terreno producto de un exceso de la cantidad que este puede absorber (“runoff - National Geographic Society,” n.d.) (Figura 8).



Figura 7: Ganancias de agua por actividades socio-económicas (IST-CI, 2015)

Las pérdidas de agua para nada son fáciles de medir. A través de registros hidrométricos arrojados por puntos de medición tanto aguas abajo como arriba, pueden ser analizadas y estimadas. Con este fin se realizan balances que incluyen registros históricos de entradas y salidas en el tramo medido. Las pérdidas y ganancias son consideradas como residuo del balance de masa que considera todos los flujos de entradas y salidas (Wurbs, 1996). A pesar de que las pérdidas del río están relacionadas a su caudal, frecuentemente son consideradas como una fracción del gasto que ingresa aguas arriba (Wurbs, 2005), sin brindar una justificación matemática consistente.



Figura 8: Esguerriminto natural (University of Hertfordshire, 2011)

2.5 Modelo matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas

Según el Dr. Humberto Silva Hidalgo en su tesis doctoral, existen 3 principales tipos de cuencas y en este apartado se muestra la ecuación correspondiente a cada una de ellas, las cuales son: (1) un cauce natural sin almacenamiento (Figura 9), (2) un cauce natural con almacenamiento en el extremo ubicado aguas abajo (Figura 10) y (3) un cauce natural con almacenamiento en un punto intermedio del mismo (Figura 11).

1. Balance Hídrico en un segmento de río sin almacenamiento de agua superficial (embalses naturales o artificiales), en un espacio de tiempo desde t hasta $t + \Delta t$, donde Δt es un intervalo de tiempo.

El desarrollo matemático que se presenta en este apartado también puede ser consultado por el lector interesado en el trabajo desarrollado por Silva-Hidalgo (2010).

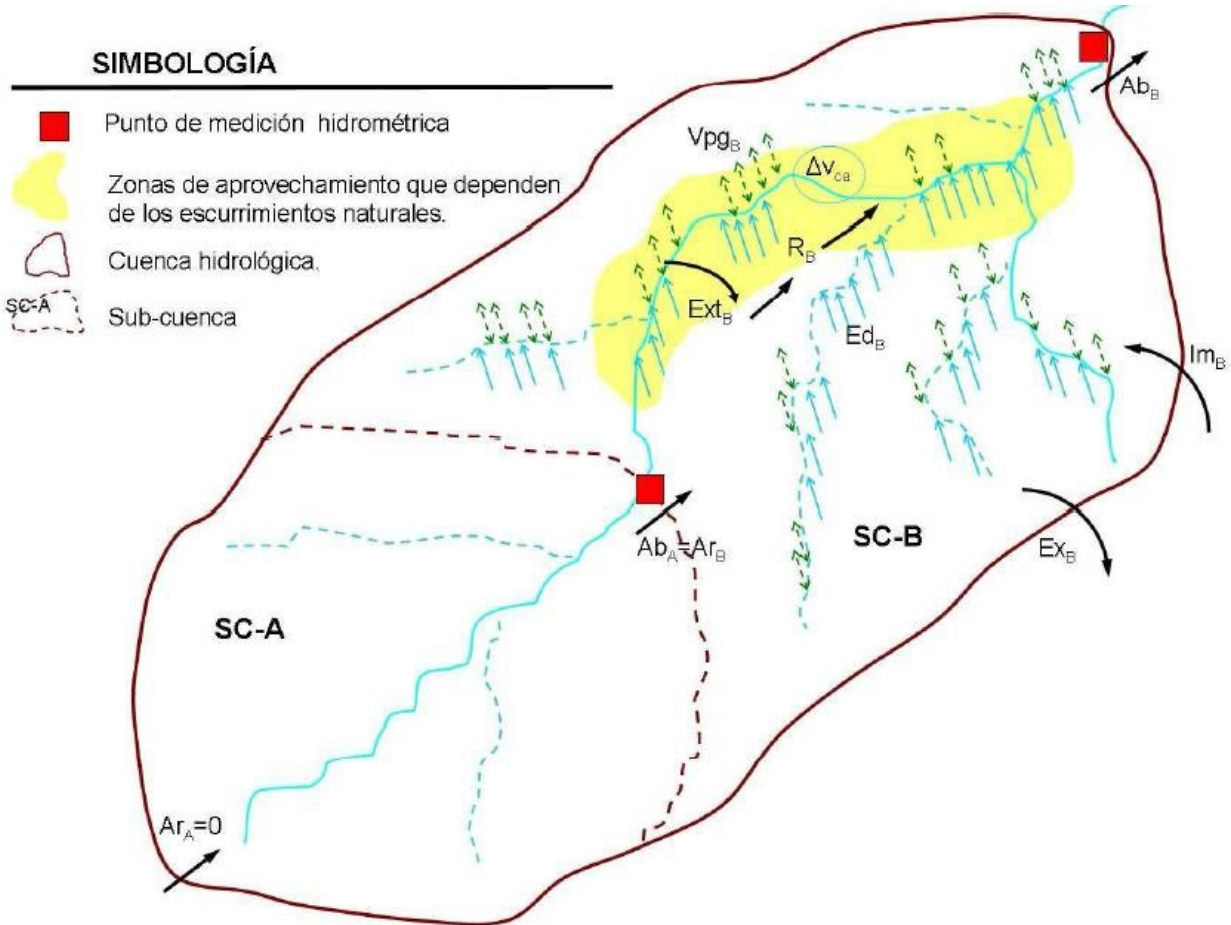


Figura 9: Cuenca sin almacenamientos de agua superficial (Silva Hidalgo, 2010)



$$\Delta V_{ca}(t; \Delta t) \equiv V_{ca}(t + \Delta t) - V_{ca}(t) = A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) + V_g(t; \Delta t) - A_b(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - V_p(t; \Delta t)$$

Ecuación 1

Sustituyendo la Ecuación 1 por partes quedan las siguientes ecuaciones:

Volumen que ingresa al tramo del cauce en cuestión desde aguas arriba:

$$A_r(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q(x_0, \tau) d\tau$$

Ecuación 2

Volumen de importaciones que ingresa al cause:

$$I_m(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_{im}(\tau) d\tau$$

Ecuación 3

Volumen de escurrimiento directo de entrada:

$$E_d(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_{ed}(\tau) d\tau$$

Ecuación 4



Volumen de retorno que ingresa al tramo del cauce:

$$R(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_r(\tau) d\tau$$

Ecuación 5

Volumen que sale del tramo del cauce aguas abajo:

$$A_b(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q(x_0 + L, \tau) d\tau$$

Ecuación 6

Volumen de exportaciones que sale a lo largo del tramo del cauce:

$$E_x(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_{ex}(\tau) d\tau$$

Ecuación 7

Volumen de extracciones que sale a lo largo del tramo del cauce:

$$E_{xt}(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_{ext}(\tau) d\tau$$

Ecuación 8



Volumen de ganancia (agua subterránea, flujo base o sub-superficial) que entra al cauce a lo largo del tramo:

$$V_g(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_g(\tau) d\tau$$

Ecuación 9

Volumen de pérdidas que ocurren a lo largo del tramo del cauce:

$$V_p(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_{pe}(\tau) d\tau$$

Ecuación 10

Las pérdidas y ganancias son originadas por fenómenos físicos que ocurren simultáneamente sobre el tramo del cauce. Por este motivo es favorable sustraerle la Ecuación 9 a la Ecuación 10, quedando como volumen neto de pérdida o ganancia en dependencia de su signo (+ cuando la pérdida es mayor o - cuando es mayor la ganancia):

$$V_{pg}(t; \Delta t) \equiv V_p(t; \Delta t) - V_g(t; \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q_{pe}(\tau) d\tau - \int_t^{t+\Delta t} Q_g(\tau) d\tau$$

Ecuación 11



Los volúmenes $V_{ca}(t)$ y $V_{ca}(t + \Delta t)$ y sus variaciones en Δt son muy pequeños comparados con el volumen total que pasa por el cauce en el intervalo Δt , por lo que se puede despreciar ΔV_{ca} de la Ecuación 1 quedando de la de la siguiente manera:

$$0 = A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) + V_g(t; \Delta t) \\ - A_b(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - V_p(t; \Delta t)$$

Ecuación 12

Utilizando la Ecuación 11 quedaría así:

$$0 = A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) \\ - A_b(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - V_{pg}(t; \Delta t)$$

Ecuación 13

2. Balance Hídrico en un tramo de río con almacenamiento de agua superficial en su extremo aguas abajo y un espacio de tiempo desde t hasta $t + \Delta t$.

El desarrollo matemático que se presenta en este apartado también puede ser consultado por el lector interesado en el trabajo desarrollado por Silva-Hidalgo (2010).

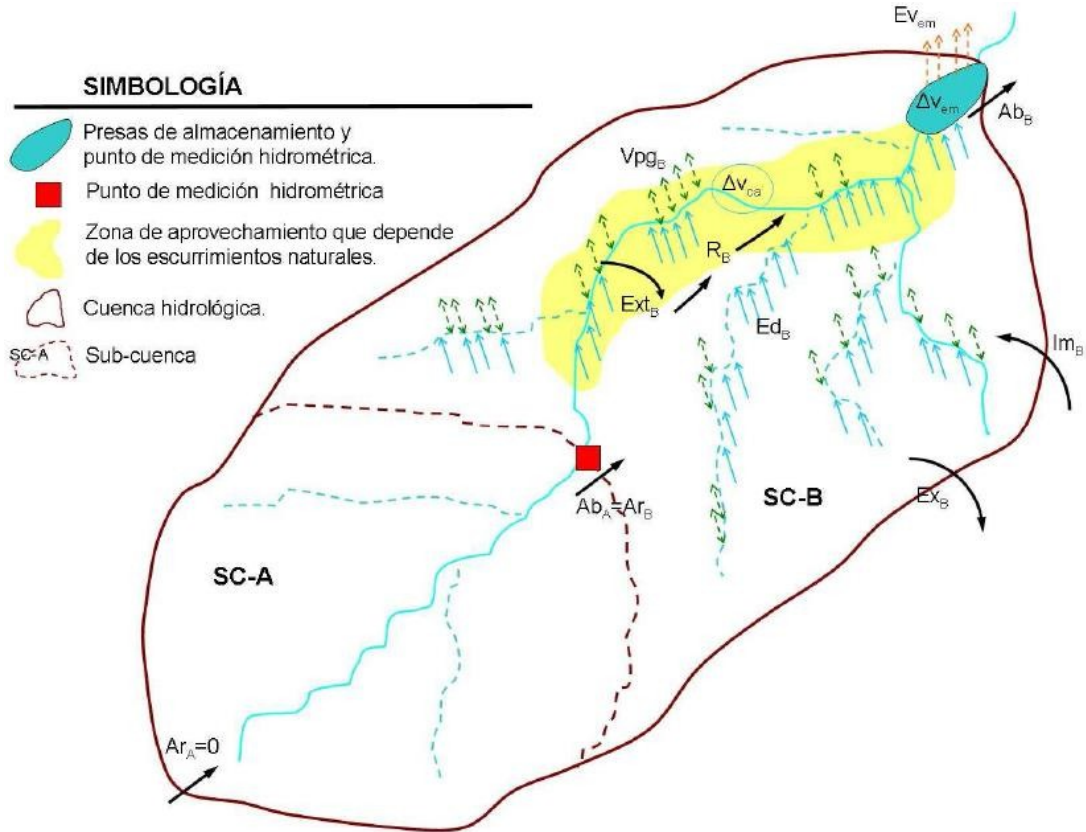


Figura 10: Cuenca con un almacenamiento de agua superficial (embalse natural o artificial) en el extremo aguas abajo del tramo de cauce (Silva Hidalgo, 2010)

Teniendo en cuenta el tratamiento matemático del apartado anterior e incluyendo el almacenamiento de agua superficial ubicado en el extremo aguas abajo la ecuación principal para este caso sería:

$$[\Delta V_{em}(t; \Delta t) + \Delta V_{ca}(t; \Delta t)] = A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) - A_b(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - E_v(t; \Delta t) - V_{pg}(t; \Delta t)$$

Ecuación 14



V_{em} es el volumen almacenado en el embalse. Despreciando ΔV_{ca} e introduciendo la notación que $V_{em}(t, \Delta t) \equiv V(t, \Delta t)$ se obtiene:

$$\Delta V(t; \Delta t) = A_r(t; \Delta t) + I_m(t; \Delta t) + E_d(t; \Delta t) + R(t; \Delta t) \\ - A_b(t; \Delta t) - E_x(t; \Delta t) - E_{xt}(t; \Delta t) - E_v(t; \Delta t) - V_{pg}(t; \Delta t)$$

Ecuación 15

Es importante aclarar que de no existir un cuerpo de agua en el extremo aguas abajo, tanto ΔV como E_v toman valor 0, convirtiéndose la Ecuación 15 en la Ecuación 13.

3. Balance Hídrico en un tramo de río con almacenamiento de agua superficial en un punto intermedio y un espacio de tiempo desde t hasta $t + \Delta t$.

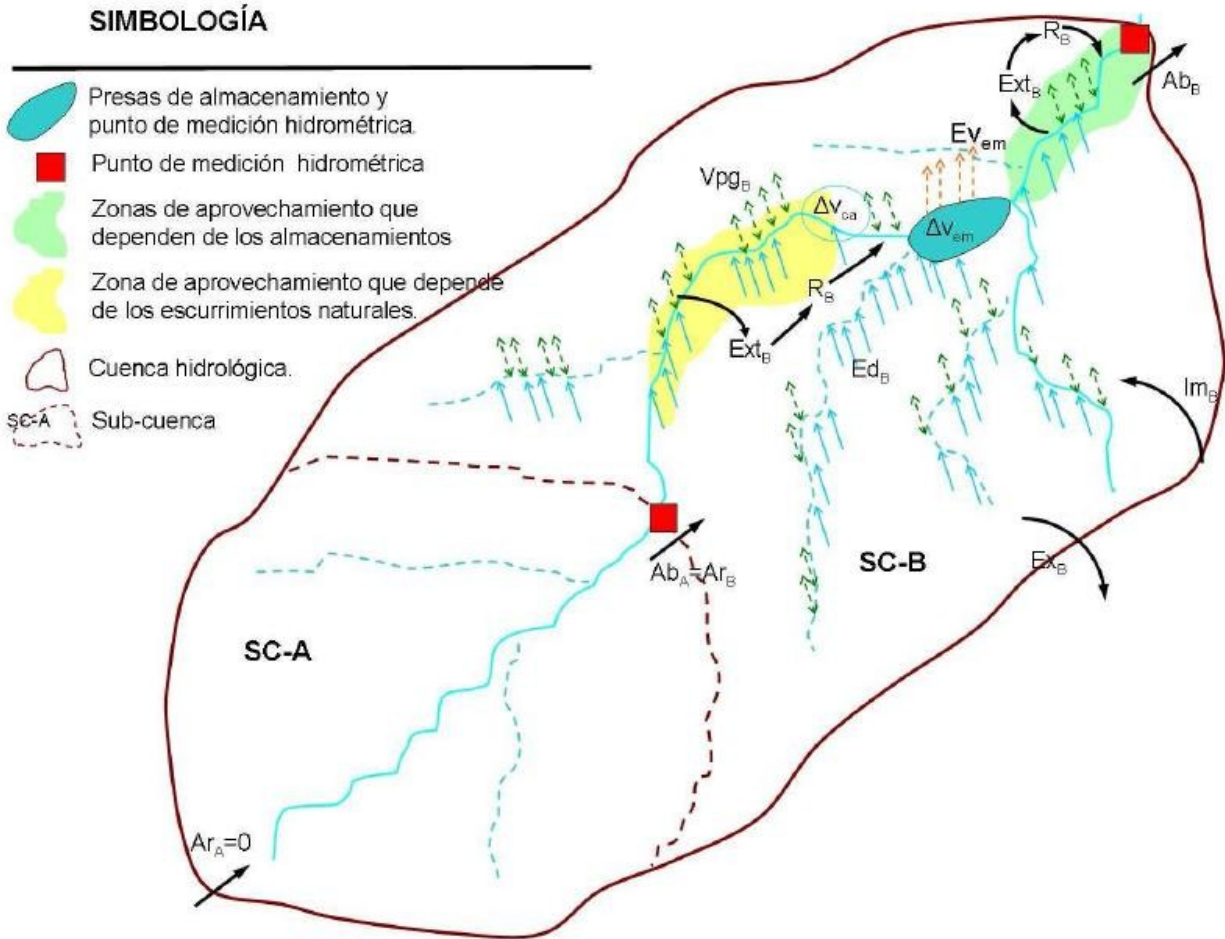


Figura 11: Cuenca con un almacenamiento de agua superficial (embalse natural o artificial) en un punto intermedio de un tramo de cauce (Silva Hidalgo, 2010).

Al aplicar el principio de conservación de masa a este caso de estudio es posible obtener la Ecuación 14. Planteando el modelo conceptual de una cuenca o sub-cuenca de este tipo se pueden identificar los componentes de la ecuación de balance en sistemas río/presa más complejos. Siendo así es posible obtener una ecuación que represente el caso en cuestión. Es importante tener cuidado a la hora de identificar cada componente que interviene en la ecuación de conservación de masa según el caso.



CAPÍTULO III. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS



3.1 Introducción

En este capítulo son descritas las metodologías diseñadas por el autor para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos. Las metodologías están compuestas por actividades, herramientas y resultados esperados. Las actividades son las acciones a realizar o qué se debe hacer para dar cumplimiento a cada objetivo. Las herramientas son software, técnicas, tecnologías, recursos, etc.; que van a permitir o facilitar la realización de las actividades, es decir, son el con qué se van a realizar las mismas. Los resultados esperados, como literalmente lo dice, son lo que se espera como producto de la aplicación de las metodologías y dan cumplimiento al objetivo general. Más adelante será posible verificar el cumplimiento de cada uno de los resultados en el Capítulo IV.

3.2 Metodología Objetivo Especifico 1

Para realizar el análisis y diseño del software deseado se diseñó la metodología mostrada en la Figura 12. Está compuesta por cinco actividades que, con el uso de cinco herramientas, permitirán alcanzar tres resultados principales. La obtención de los resultados esperados en esta metodología garantiza las bases para comenzar a dar cumplimiento al objetivo específico 2 que es el desarrollo del software.

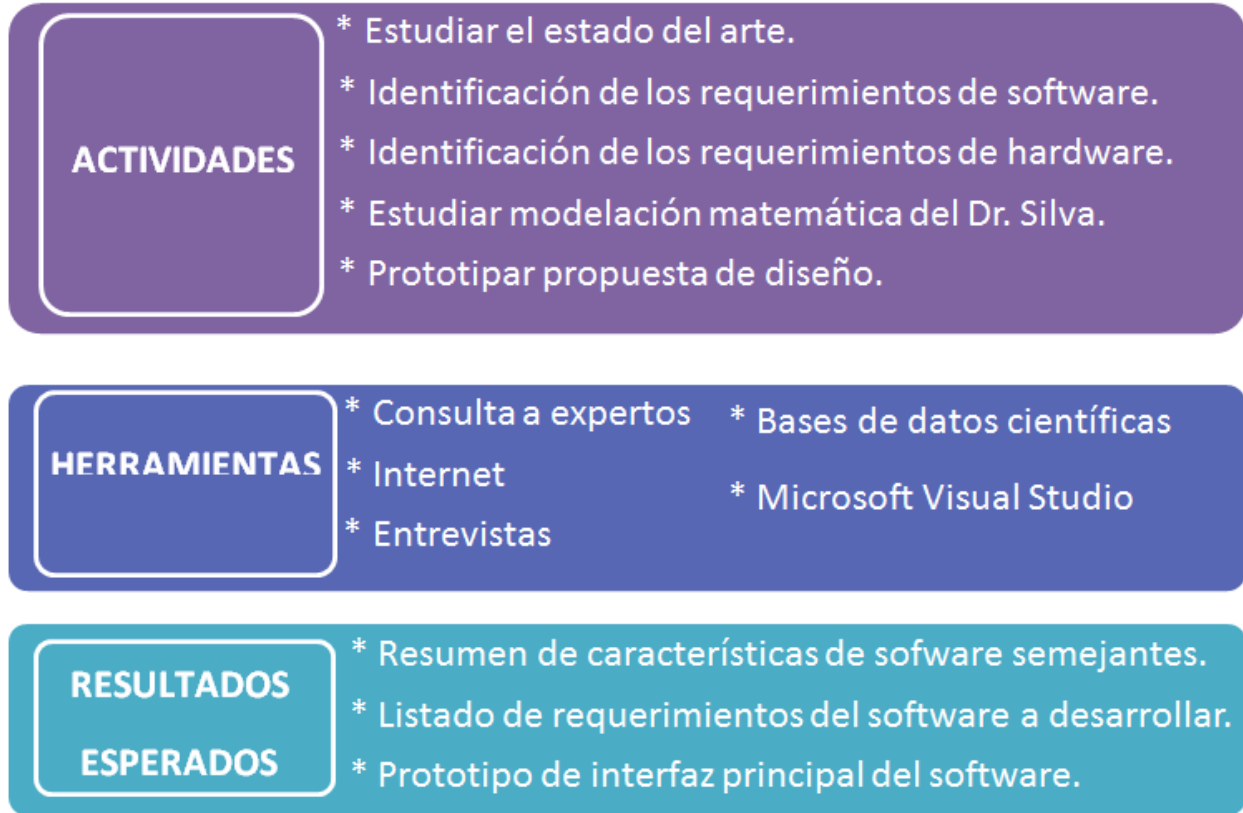


Figura 12: Metodología Objetivo Especifico 1

3.3 Metodología Objetivo Especifico 2

Esta metodología fue elaborada para implementar la solución propuesta. Como se puede observar en la Figura 13, está formada por cuatro actividades, cuatro herramientas y tres resultados esperados. Una vez cumplido el objetivo específico 1 está todo preparado para comenzar el desarrollo del software que es la parte práctica de este trabajo. Entre los resultados esperados de esta metodología se encuentra la obtención la primera versión funcional del software, lo cual da cumplimiento al objetivo general del trabajo.

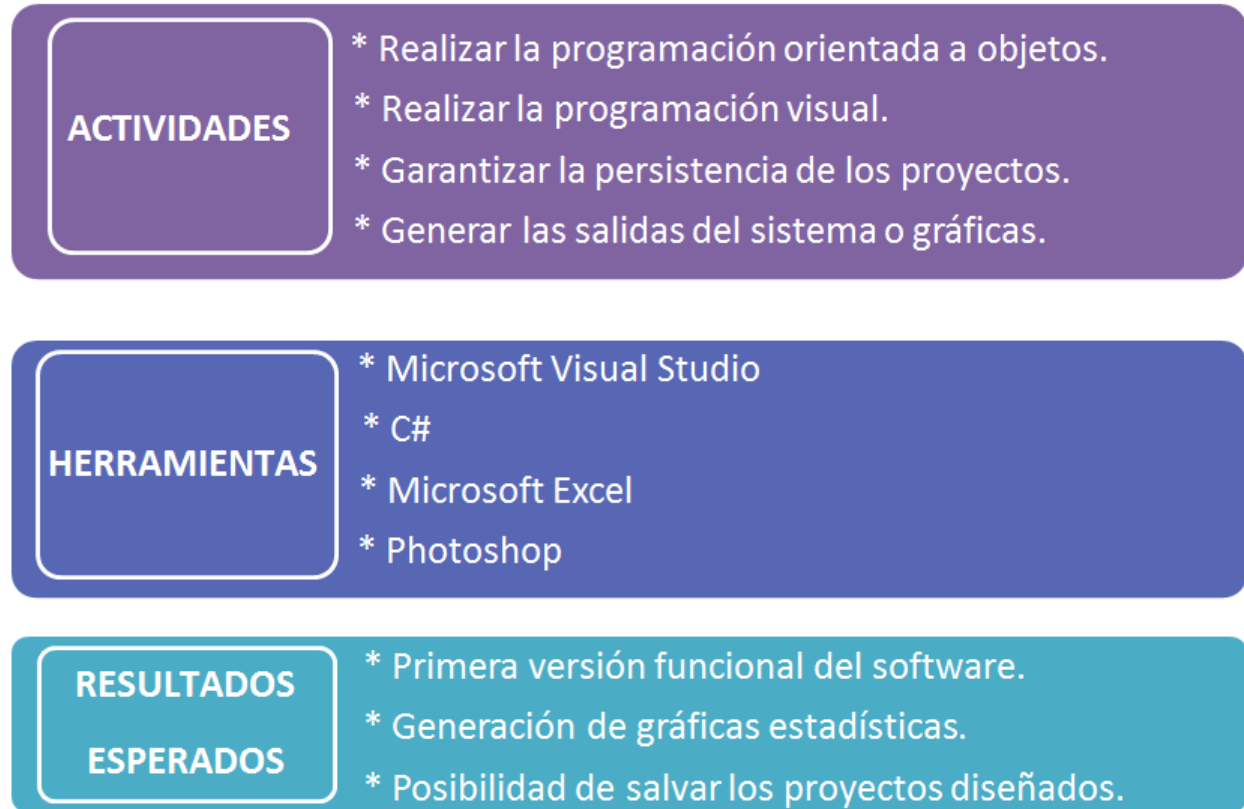


Figura 13: Metodología Objetivo Especifico 2

3.4 Metodología Objetivo Especifico 3

Con la primera versión del software se hace necesario aplicar una serie de pruebas para garantizar su correcto funcionamiento, compatibilidad, rendimiento y alcance. Para satisfacer esta necesidad y dar cumplimiento al objetivo específico 3 es diseñada esta metodología que se describe en la Figura 14. Presenta cinco actividades, seis herramientas a utilizar y espera tres resultados.

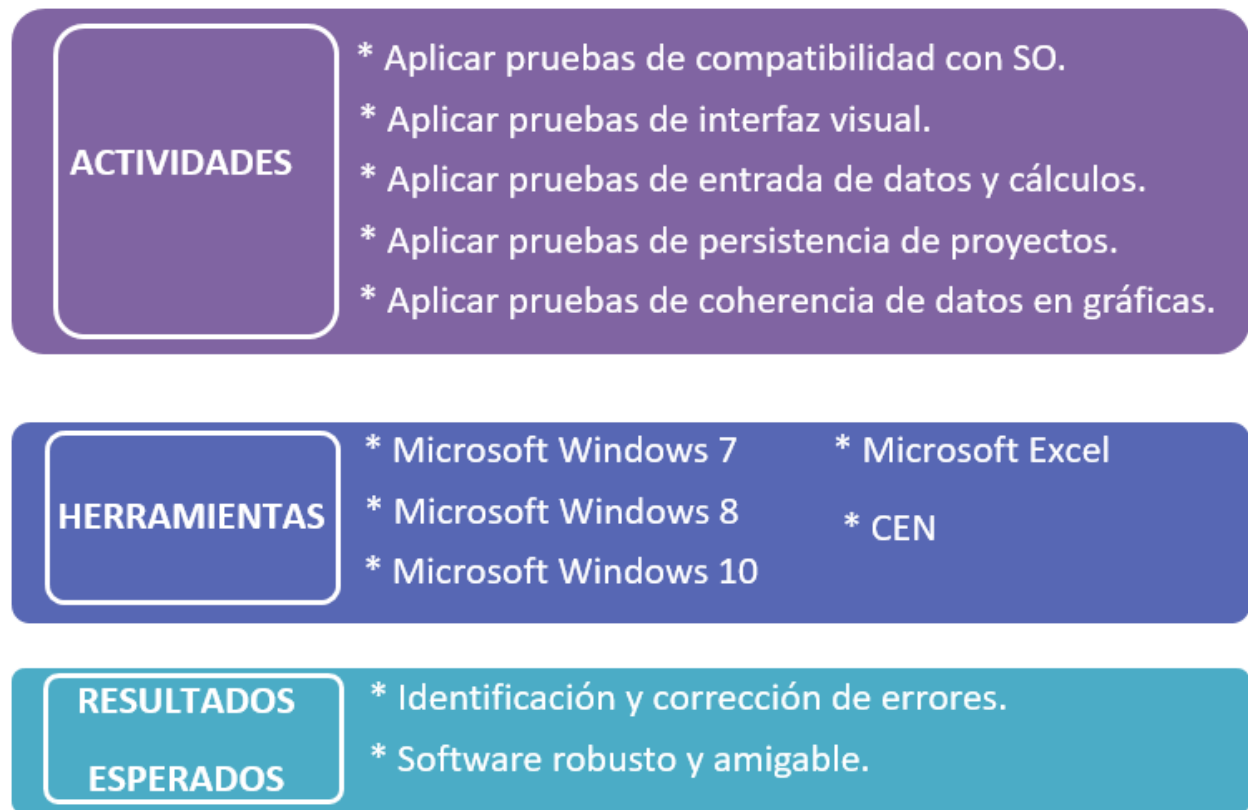


Figura 14: Metodología Objetivo Especifico 3



CAPÍTULO IV. RESULTADOS



4.1 Introducción

En este capítulo es posible apreciar la aplicación de las metodologías descritas en el capítulo anterior. Abarca los resultados obtenidos como salida de las mismas. Una vez elaboradas las metodologías para dar cumplimiento a los objetivos específicos de este trabajo y con estos al objetivo general, se procede a la parte práctica arrojando los resultados que se pueden apreciar a continuación; tales como la descripción de las características los software semejantes, listado de requerimientos funcionales y no funcionales y la propuesta inicial y no funcional de la interfaz o vista principal del software.

4.2 Resultados del Objetivo específico 1.

Realizar el análisis y diseño del software deseado.

4.2.1 Resultado 1: Resumen de características de software semejantes.

En el epígrafe 1.1.1 de este trabajo se realiza un análisis detallado de algunos de los software con características semejantes a la solución esperada. Entre ellos están WEAP, HEC-HMS y WRAP. Además, se plasma a modo de conclusión parcial que, estos software aportaron buenas ideas para el diseño y funcionalidad de la solución propuesta en este trabajo; sin embargo fueron descartados como soluciones para la problemática tratada ya que realizan otros tipos de cálculos que se van fuera del contexto y las necesidades descritas con anterioridad.

4.2.2 Resultado 2: Listado de requerimientos del software a desarrollar.

1. Requerimientos funcionales.



Los requerimientos funcionales especifican las funcionalidades u operaciones que el software debe cumplir para abarcar completamente sus objetivos y se mencionan a continuación:

- a) Debe permitir al usuario escoger el tipo de cuenca que desea analizar.
- b) Debe contener un panel de diseño para que el usuario interactúe diseñando la cuenca que desea analizar.
- c) Debe permitir que, opcionalmente, el usuario cargue una imagen de fondo que se supone sea una imagen satelital o mapa que muestre la sub-cuenca en análisis, para que el diseño quede sobre ella y así quede más real y amigable.
- d) Debe brindar la opción de crear elementos del diseño como puntos de medición en forma cuadrada y embalses en forma triangular, así como líneas de interconexión entre elementos que representan el caudal de la cuenca.
- e) Las líneas de interconexión deben indicar el sentido del flujo del agua (aguas arriba o abajo)
- f) Debe presentar una opción para eliminar los elementos que puedan ser eliminados, por si ocurre el caso en el que el usuario no desee alguno de los ya agregados.
- g) Debe ser posible mover los elementos de sus posiciones iniciales sobre cualquier coordenada dentro del panel de diseño, para ubicarlos sobre su posición exacta en el mapa de fondo.
- h) Debe permitir agrandar o achicar los elementos, cambiar los colores de los mismos y el grosor de las líneas de los mismos para que sea más amigable para el usuario, permitiendo personalizar los diseños al gusto del usuario.
- i) Debe, en dependencia del tipo de cuenca escogido, proponer un diseño básico, con las características mínimas obligatorias, para que posteriormente el usuario lo modifique o personalice a gusto.



- j) Debe permitir la creación, salva, carga, modificación de proyectos; los cuales se constituyen por la imagen de fondo, los elementos y los datos recogidos. Así se garantiza la persistencia en el tiempo de los proyectos.
- k) Cada proyecto debe ser salvado en un archivo XML y contener toda la información, para que sea portable y ser enviado fácilmente por email.
- l) En dependencia del diseño, debe brindar la posibilidad de generar un formato Excel vacío con las columnas necesarias para que el usuario lo llene con los registros históricos y así evitar problemas de incompatibilidad de los datos de entrada.
- m) Debe permitir al usuario la importación o carga de registros históricos de mediciones de volúmenes en cuencas, necesarios para realizar los cálculos.
- n) Con la carga de los registros históricos se debe en automático calcular los resultados según el modelo matemático del Dr. Silva.
- o) Debe brindar la posibilidad de generar gráficas o hidrogramas donde se muestre el comportamiento del escurrimiento natural a lo largo del espacio de tiempo de los registros entrados, como resultado final del proceso de cálculo, para que le usuario lo analice y pueda tomar decisiones o llegar a conclusiones.
- p) En caso de errores, debe mostrar mensajes detallados al usuario para dar a este por enterado.
- q) Debe presentar opciones para el cambio de idioma del software, los cuales serán Español por default e inglés para una mejor internacionalización y comprensión de usuarios no hispanohablantes.

2. Requerimientos no funcionales.



Los requerimientos no funcionales especifican las características del ambiente sobre el cual va a funcionar el software para cumplir sus objetivos y se mencionan a continuación:

- a) Debe permitir instalarse y funcionar en una computadora de manera local, sin necesidad de conectarse a otras computadoras o servicios relacionados con algún tipo de red o comunicación entre equipos de cómputo.
- b) Debe ser compatible con la mayoría de las versiones de Windows como sistema operativo, desde la más moderna hasta la más antigua como prioridad.
- c) Espacio mínimo de almacenamiento de 5 Mb.
- d) Procesadores de un solo núcleo a una velocidad mínima de 2.0 GHz.
- e) Memoria RAM mínima de 512 Mb.
- f) Framework .Net.
- g) Microsoft Excel a partir de la versión 2003 en adelante.
- h) Resolución de pantalla mínima de 1024x768 Px.
- i) Mouse y teclado de cualquier tipo.

4.2.3 Resultado 3: Prototipo no funcional de interfaz principal del software.

El prototipo de interfaz principal del software es el diseño de la propuesta inicial que muestra o da una idea de cómo debe quedar la vista inicial del sistema al abrir por primera vez, es decir lo que el usuario vería después de abrir el software y antes de comenzar a interactuar con el mismo. En la Figura 15 se puede observar la propuesta mencionada.

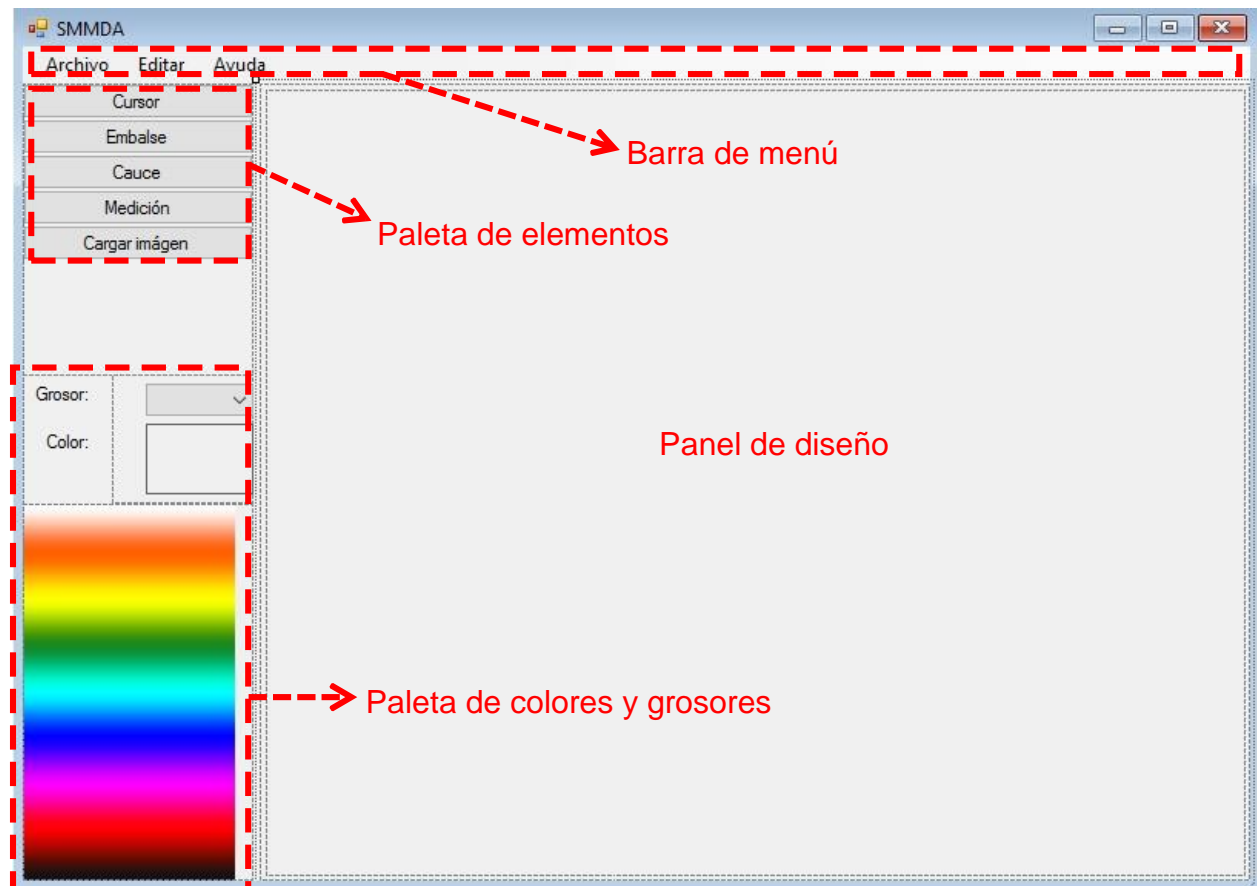


Figura 15: Prototipo no funcional de interfaz principal

4.3 Resultados del Objetivo específico 2.

Implementar la solución propuesta.

4.3.1 Resultado 1: Primera versión funcional del software.

Partiendo del prototipo de interfaz principal del resultado 3, mostrado en la Figura 15, y dando cumplimiento a los requerimientos anteriormente mencionados se le da continuación a este trabajo comenzando la implementación del sistema.

Con el objetivo de dar a escoger al usuario el tipo de cuenca que desea analizar en la Figura 16 se muestra la implementación de un campo de selección simple con los tipos de cuencas existentes para este trabajo.

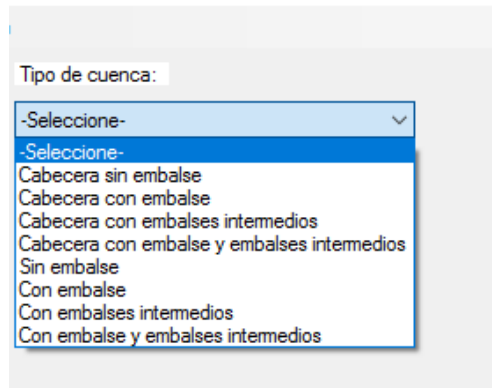


Figura 16: Seleccionar el tipo de cuenca

En la Figura 15 es posible observar como la ventana principal del software fue dividida en 3 secciones, la sección superior para los menús, la sección izquierda para la paleta de botones y herramientas, y la sección más grande a la derecha que es el panel de diseño.

La Figura 17 se puede observar la utilidad el botón para cargar la imagen de fondo, una vez escogida la imagen desde alguna fuente de almacenamiento de la computadora, esta se auto ajusta al tamaño del panel de diseño como fondo.

Para la inserción de los elementos del diseño que representan los elementos de una sub-cuenca se hace uso de los botones correspondientes a cada uno. En el caso de la línea del cauce, es trazada de manera automática teniendo en cuenta que la sub-cuenca debe ser diseñada desde aguas arriba hasta aguas abajo por lo que el sentido que se le da por defecto es desde el primer elemento insertado hacia el segundo y así consecutivamente. Ejemplo de esto se puede observar en la Figura 18.

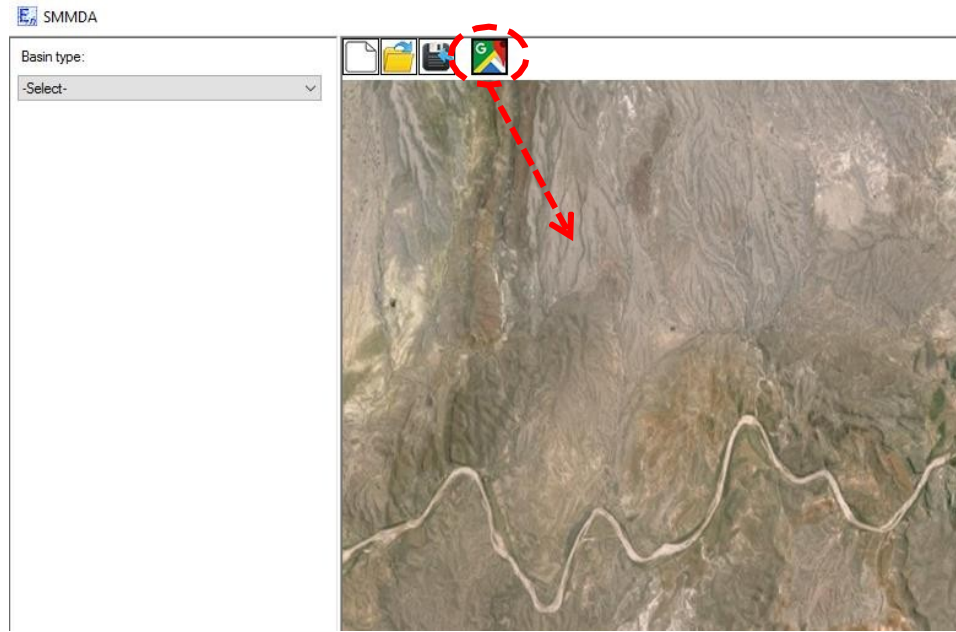


Figura 17: Carga de imagen de fondo

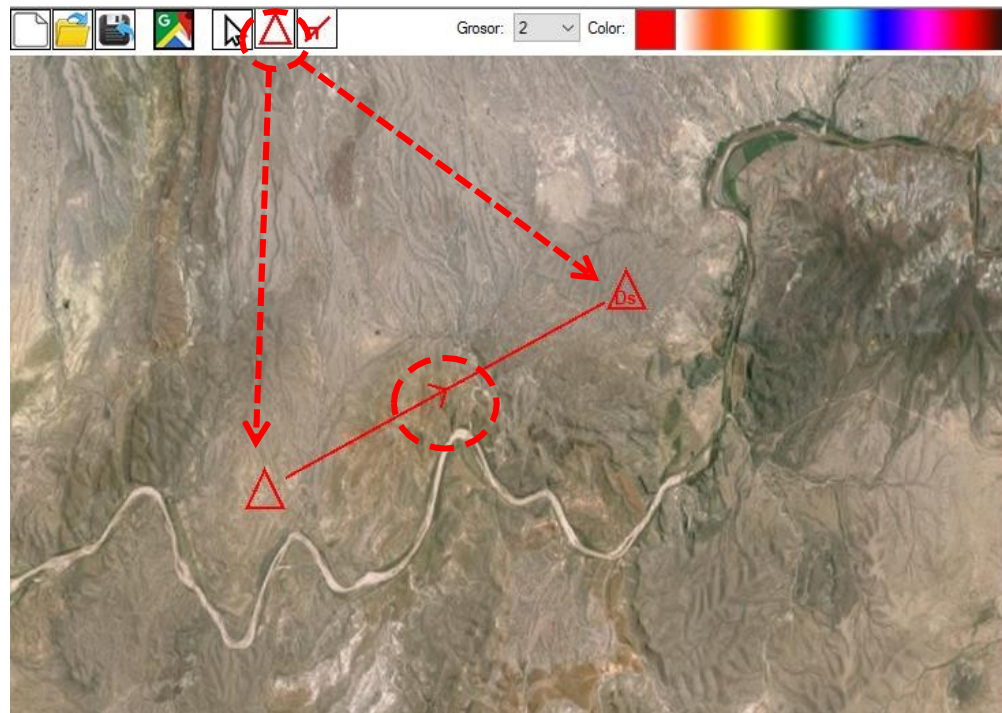


Figura 18: Inserción de elementos del diseño

Con el objetivo de permitir la eliminación de elementos, siempre y cuando el tipo de cuenca lo permita, en la Figura 19 se observa que al dar clic derecho sobre un elemento se despliega un menú que además permite invertir el sentido en el que el agua del cauce fluye.



Figura 19: Eliminar elemento e invertir sentido del cause

También fueron implementados algoritmos para permitir el movimiento de los elementos de la sub-cuenca hacia cualquier coordenada dentro del panel de diseño. En la Figura 20 se observa las posiciones iniciales y finales de un elemento que fue movido de un lugar a otro. Los movimientos se realizan dando presionando el clic izquierdo del mouse y arrastrándolo hasta la nueva posición deseada.



Figura 20: Movimiento de elementos



Figura 21: Cambio de tamaño de los elementos

La Figura 21 muestra ejemplo de tres elementos de diferentes tamaños. Esto demuestra la posibilidad de agrandar o achicar los mismos. Para que el usuario pueda hacer esto debe colocar el mouse sobre uno de los bordes del elemento hasta que el ícono del mouse cambie a su forma de cambio de tamaño y luego se arrastra hasta que la figura tome el tamaño deseado.

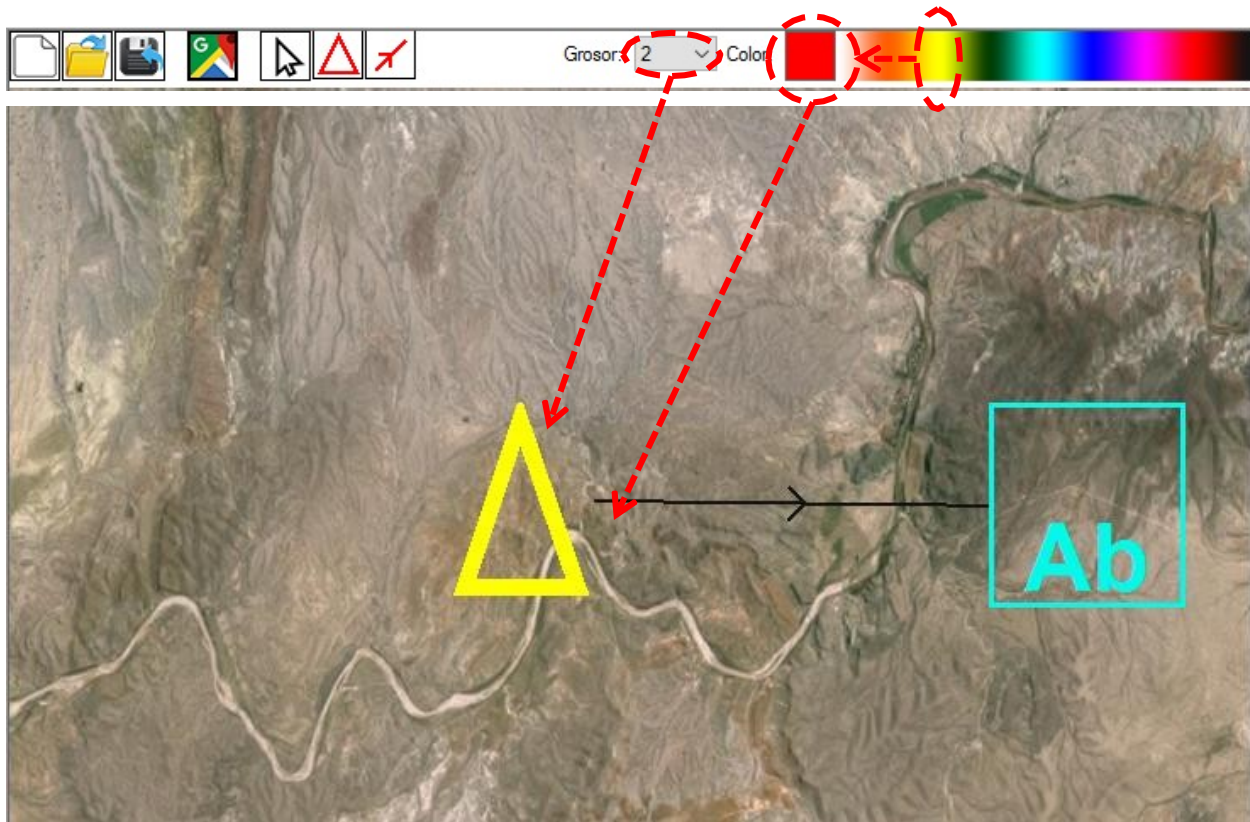


Figura 22: Color y grosor de los elementos

La Figura 22 muestra un ejemplo del uso de la paleta de colores y grosores para personalizar los elementos del diseño al gusto del usuario y así volverlo más amigable.

Para facilitarle el trabajo al usuario y además evitar algunos errores de concepto, se decidió que al usuario seleccionar el tipo de cuenca a analizar, el software en automático le brindaría una propuesta de diseño inicial acorde a la selección con los

elementos mínimos necesarios. Como se ve en la Figura 23 la propuesta es en línea recta, pero el usuario como se vio anteriormente tiene la posibilidad de mover los elementos a donde guste según la posición que deban tener respecto a la imagen de fondo.

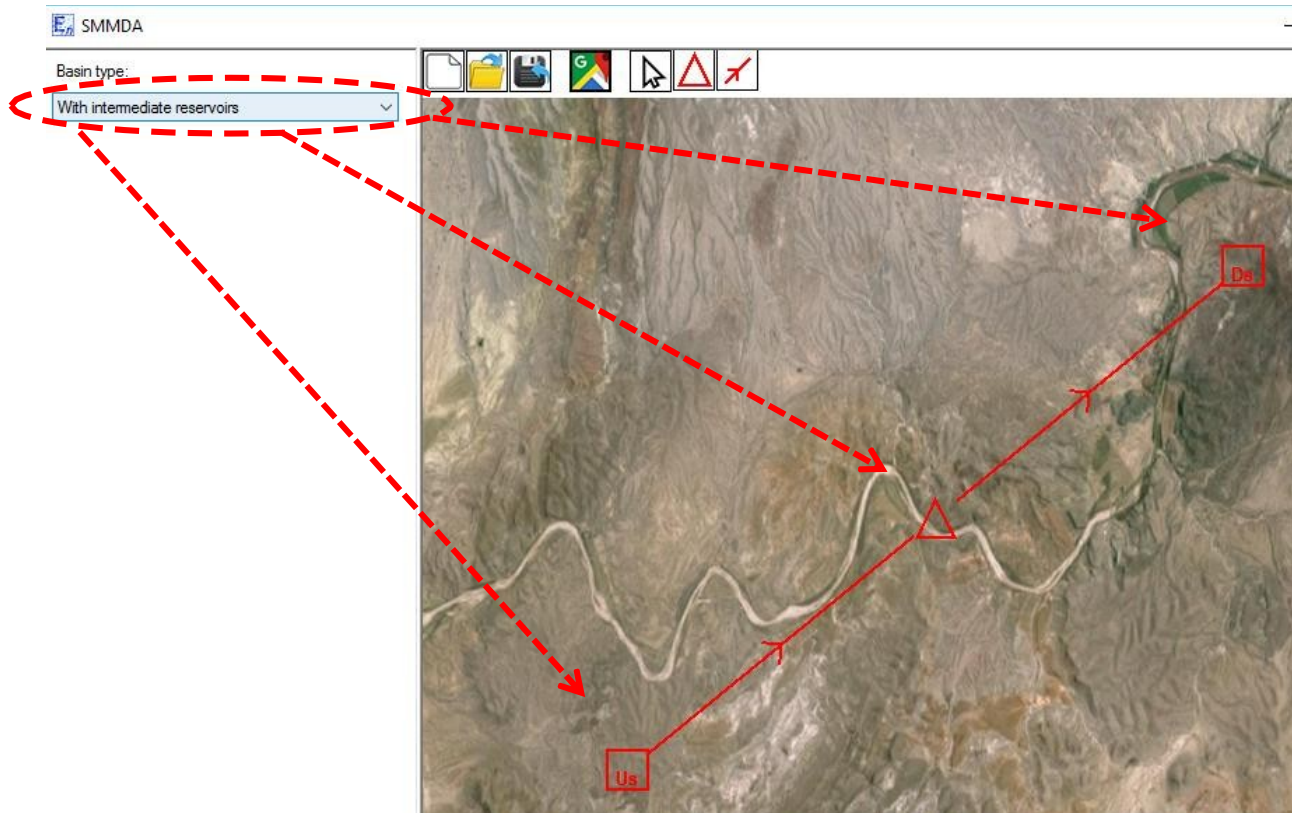


Figura 23: Auto propuesta de diseño al seleccionar el tipo de cuenca

Una vez diseñada y personalizada la sub-cuenca, se procede a la entrada de datos. Para esto el sistema brinda la posibilidad de, que en dependencia del tipo de cuenca seleccionada así como del diseño, importar o cargar los datos de los registros históricos desde documentos Excel. Para evitar problemas de incompatibilidad con el formato de entrada es brindada además, la opción de generar o descargar un formato de Excel vacío con las columnas necesarias en el orden esperado para que posteriormente

sea llenado y cargado para efectuar correctamente los cálculos (Figura 24). También se le piden una serie de datos al usuario para compactar el formato y este no pida información innecesaria; así como el período en que se encuentran los registros históricos a analizar y en caso de requerir el cálculo del retorno de irrigación también se le pide el período de estiaje o sequía.

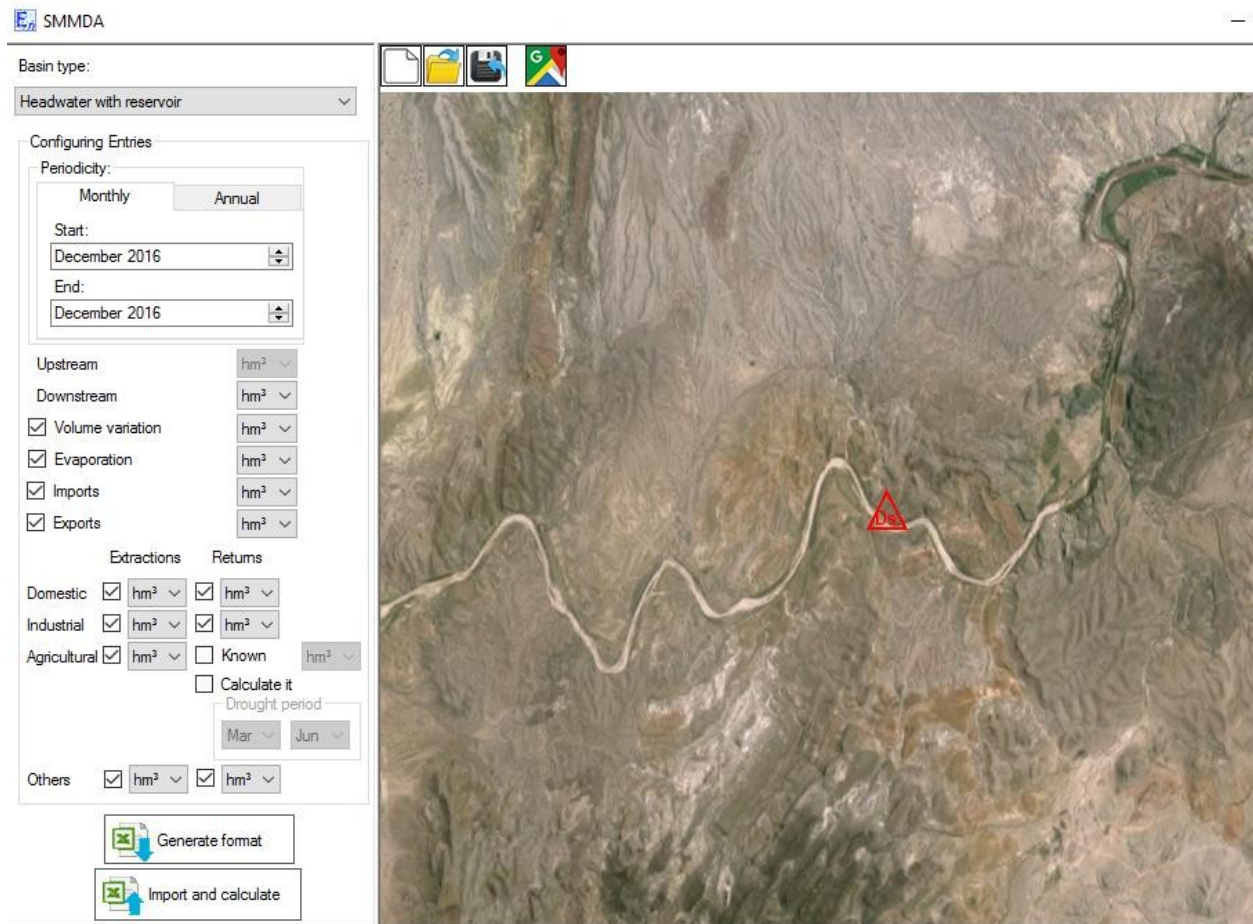


Figura 24: Entrada de datos al sistema

En la Figura 25 se muestra un ejemplo de formato generado para la entrada de datos históricos de una cuenca de cabecera con embalse. En este caso, antes de ser generado el formato, se le especificó al software que los registros son mensuales y datan desde Enero de 1950 hasta Diciembre de 2008 (Figura 24). Además, fue configurado



para tener en cuenta las variables aguas abajo, variación de volumen de la presa, evaporación de la presa y extracción agrícola. Las extracciones agrícolas, que se realizan para el riego en sembrados dentro del área que enmarca a la cuenca, generalmente cuentan con un retorno de irrigación. En este ejemplo se le dice al software que no se conoce cuánta agua de riego retorna al cauce y por lo tanto se desea que sea calculada.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Año	Mes	Aguas abajo	Variación de volumen 1	Evaporación 1	Ext. Agrícola		
2	1950	Jan						
3		Feb						
4		Mar						
5		Apr						
6		May						
7		Jun						
8		Jul						
9		Aug						
10		Sep						
11		Oct						
12		Nov						
13		Dec						
14	1951	Jan						
15		Feb						
16		Mar						
17		Apr						
18		May						
19		Jun						
20		Jul						

Figura 25: Formato vacío para poner los registros históricos

Una vez llenado este formato con los registros mensuales correspondientes al tramo del cauce especificado, es posible importarlos al software. De manera automática, para este ejemplo, se realiza tanto el cálculo del retorno de irrigación como el del escurrimiento natural y son insertados en el Excel importado, como se puede apreciar en

la Figura 26. Aquí se observa como luego de la columna de los registros de extracciones agrícolas fueron insertadas 3 nuevas columnas, las cuales representan los cálculos realizados. La primera es el retorno agrícola o de irrigación que regresó al cauce. La segunda es el escurrimiento natural obtenido del cálculo pero, como es posible apreciar, en ocasiones este cálculo puede dar negativo, lo cual es físicamente imposible ya que para los volúmenes de agua el valor mínimo es cero. Para resolver este problema se decide convertir a cero los valores negativos e insertarlos en una tercera columna quedando esta como el resultado final del modelo.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Año	Mes	Aguas abajo	Variación de volumen 1	Evaporación 1	Ext. Agrícola	R. Agrícola	Escurrimiento apri	Escurrimiento apos	
	Mar	7.487	-8.2	1	0.0234	0.002342997	0.31042997	0.31042997	
	Apr	11.975	-13.8	1	0.0416	0.004163256	-0.783367442	0	
	May	15.444	-17.9	0.8	0.0570	0.005700954	-1.598990465	0	
	Jun	3.744	10.3	0.6	0.0365	0.003646452	14.68046452	14.68046452	
	Jul	0.046	56.4	0.8	0.0342	0.003422381	57.28022381	57.28022381	
	Aug	1.001	46.8	1.3	0.0280	0.002796508	49.12896508	49.12896508	
	Sep	9.68	14	1.5	0.0283	0.002825611	25.20825611	25.20825611	
	Oct	0.102	1.3	1.6	0.0074	0.000736919	3.009369195	3.009369195	
	Nov	1.648	-2.7	1.8	0.0017	0.000168009	0.749680092	0.749680092	
	Dec	0	0.1	1.8	0.0004	3.81458E-05	1.900381458	1.900381458	
	1985	Jan	3.173	-2.1	1.2	0.0093	0.00092814	2.2822814	2.2822814
		Feb	9.27	-10.9	1.7	0.0361	0.003610555	0.10610555	0.10610555
Mar		9.35	-12.1	1.4	0.0441	0.004405345	-1.305946554	0	
Apr		14.316	-16	1.4	0.0783	0.007827828	-0.205721723	0	
May		18.14	-22.9	1.4	0.1072	0.010719034	-3.252809657	0	
Jun		10.197	-10.4	1.1	0.0686	0.006856123	0.96556123	0.96556123	
Jul		10.882	-10.9	1.1	0.0643	0.006434821	1.146348207	1.146348207	
Aug		14.558	-11.3	1	0.0526	0.005258043	4.310580433	4.310580433	
Sep		5.122	10.2	1	0.0531	0.005312765	16.37512765	16.37512765	

Figura 26: Salidas del sistema

Para una mejor comunicación con el usuario son manejados una serie de mensajes de advertencia y de error. Estos mensajes advierten al usuario sobre determinadas acciones que está realizando o a punto de realizar y que pudieran afectar su trabajo realizado con el software hasta el momento; brindando varias opciones para que confirme si desea seguir o no. También se manejan mensajes de error para evitar situaciones prohibidas y validar el correcto funcionamiento. La Figura 27 muestra un

ejemplo de advertencia que le da a conocer al usuario que ha realizado cambios en el proyecto, los cuales aún no ha guardado y esto pudiera traerle inconvenientes si continúa sin tomar una decisión entre guardarlos y continuar, no guardarlos y continuar o cancelar para detener la acción que iba a realizar.

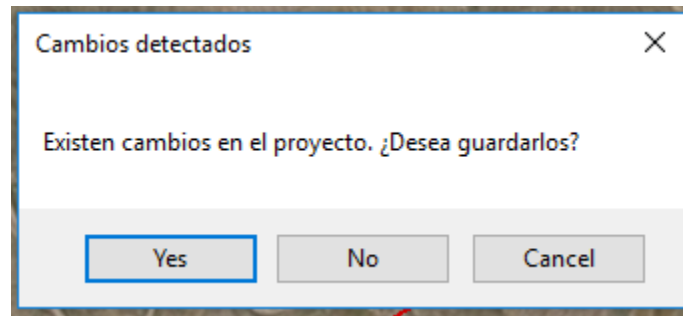


Figura 27: Mensaje de advertencia de cambios en el proyecto

El siguiente mensaje de la Figura 28 es de error y aparece en el momento en el que el usuario intenta dibujar un elemento del diseño muy cerca de otro ya dibujado. Esto significa que ambos elementos quedarían uno encima del otro, lo cual no está permitido. En este caso el usuario da clic en OK y debe intentar nuevamente colocar el elemento deseado a una distancia lo suficientemente alejado del resto para que no quede encima de estos.

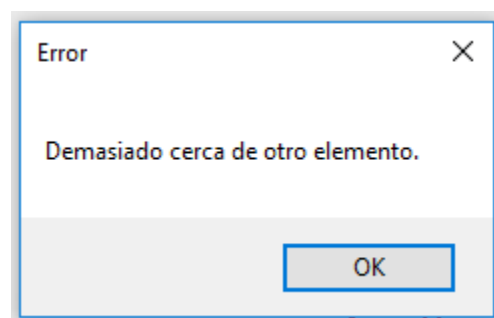


Figura 28: Error de colocación de elementos demasiado cerca

Otro ejemplo de mensaje se puede observar en la Figura 29. Surge en el momento que el usuario intenta tanto generar un formato Excel nuevo como cuando quiere importar uno lleno y dentro del formulario de configuración tiene marcada la opción de extracción sin marcar que el retorno es conocido o se debe calcular.

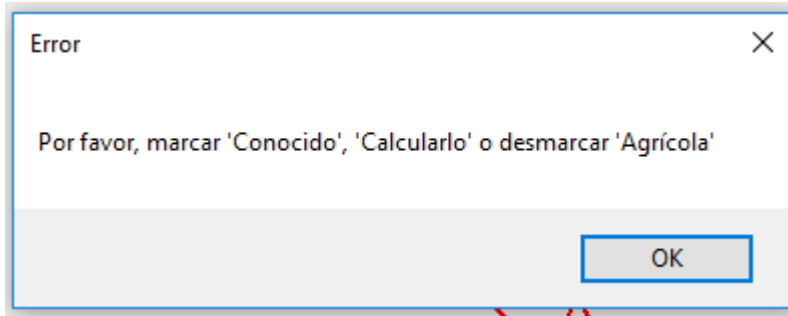


Figura 29: Error de validación de datos del formulario

Para culminar la etapa de desarrollo del software y dando cumplimiento al objetivo específico 2, fue implementada una estrategia de internacionalización. Esta consiste en detectar, antes de que el software sea visualizado, el idioma del sistema operativo donde está siendo ejecutado. Una vez identificado el idioma existen dos opciones si es español todos los textos mostrados aparecerán en español, si es cualquier otro idioma entonces se mostrarían en inglés. Para lograr el dinamismo que conlleva el tratamiento de dos idiomas fueron elaborados dos diccionarios de frases y palabras. Para evitar errores y hacer uso de buenas prácticas de programación, estos diccionarios eran retroalimentados a la vez. A medida que iba siendo necesario mostrar cualquier tipo de texto a través del software primero era construida la frase en el diccionario de español y luego elaborada su equivalente en inglés.

Realizando un estudio se pudo concluir que el primer paso para internacionalizar un software es traducirlo al inglés, dado que es el más hablado y estudiado en el mundo, tanto materno como de segundo idioma. De esta manera con solo 2 idiomas abarcados ya se puede considerar la solución como internacionalizada.

4.3.2 Resultado 2: Generación de gráficas estadísticas.

Al mismo tiempo que se insertan los cálculos obtenidos dentro del Excel de los registros históricos, es generado el hidrograma correspondiente a los mismos como se muestra en la Figura 30. Esta gráfica contiene en el eje horizontal los 12 meses del año y en el eje vertical, de manera dinámica, un rango de valores en hectómetros cúbicos (hm^3), que abarca todos los promedios mensuales obtenidos de la aplicación del modelo matemático del Dr. Silva. Claramente son apreciables las temporadas de estiaje y de lluvia en este ejemplo. Se le brinda la posibilidad al usuario de cambiar la unidad de medida de hm^3 a dm^3 o m^3 según sea su preferencia. Son mostradas un total de 11 series en la gráfica que representan el comportamiento del escurrimiento natural calculado con 11 valores diferentes de retornos de irrigación, que van desde 0 hasta 50%. A la izquierda se aprecia que cada serie está relacionada con una opción para ser escogida, de manera que el software le muestra al usuario la mejor serie (ya seleccionada) y las series que son consideradas como factibles dentro de las reglas del modelo matemático. Además, se le da la posibilidad de escoger las opciones no abarcadas por el método para más flexibilidad. Cada opción tiene un color diferente que es el mismo de la serie que representa. Una vez que es escogida, se remarca a su alrededor y su serie se vuelve más gruesa que el resto. Cuando ya el usuario se decide por una serie tiene la posibilidad de exportar a Excel la tabla de escurrimientos naturales correspondiente al retorno de irrigación seleccionado (botón ubicado en la parte inferior izquierda), dando como resultado el mostrado en la Figura 31.

Measurement units

Cubic meters (m³)

Cubic dekameters (dm³)

Cubic hectometers (hm³)

Drought period

Feb Jun

Better irrigation returns

Natural runoff (Rr=0.5)

Natural runoff (Rr=0.15)

Natural runoff (Rr=0)

Natural runoff (Rr=0.05)

Natural runoff (Rr=0.1)

Natural runoff (Rr=0.2)

Natural runoff (Rr=0.25)

Natural runoff (Rr=0.3)

Natural runoff (Rr=0.35)

Natural runoff (Rr=0.4)

Natural runoff (Rr=0.45)

Generate natural runoff

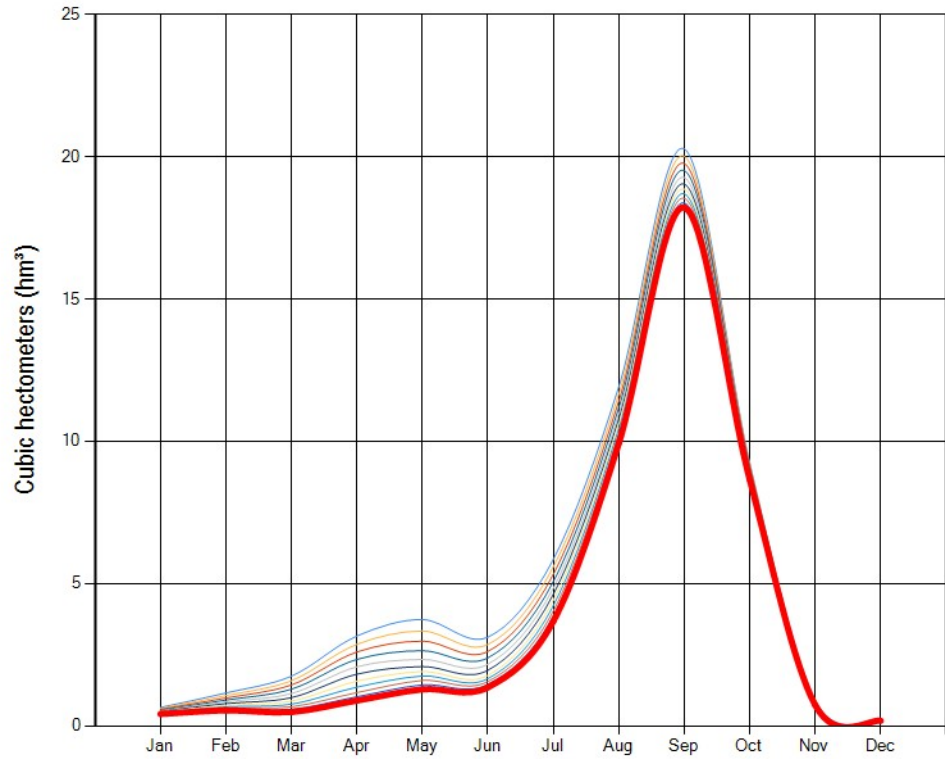


Figura 30: Hidrograma

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1950	0	0.944785879	2.277730326	2.936194976	4.751882216	0	0	0	0	0	0	0
1951	0	0.319859971	0.593072289	1.054334604	1.573166389	0.838497808	0	0	0	0	0	0
1952	0	0.119756989	0.57731556	1.219739021	1.733974864	1.932859231	11.24269322	0.395809127	1.089274891	0	0	0
1953	0	0	0.163339486	0.617856648	4.54154473	0	0	8.270552623	17.46888751	0	0	0
1954	0	0.062524231	0.435204392	0.693963274	0.597257443	0	0	10.38052021	0	0	0	0
1955	0	0	0.596811074	1.298341966	2.037180514	1.107433512	0	29.21779472	16.72459752	5.215336742	0	0
1956	0	1.173406983	3.087013873	5.329471607	6.700440243	4.688625212	4.788184833	0	0	0	0	0
1957	0	0	0.146342476	0.597121351	0.967740963	0.542413541	0	0	0	0	0	0
1958	0	0	0.336081261	0.900128714	0	0	0	0	29.75014567	178.6325462	2.338360168	0
1959	0	1.110406983	3.170013873	5.176471607	7.681440243	4.818625212	0	0	0	0	0	0
1960	0	0	0.426450654	1.013632395	1.386262151	0	0	12.70184154	0	0	0	0
1961	0	0.125448042	0.899045373	1.630952274	2.43140029	0	0	0	0	0	0	0
1962	0	0.027215283	0.574934205	1.268176527	1.887682868	1.25275613	0	0	0	0	0	0
1963	0	0.266002096	0.666817056	1.315871373	0.657572981	0	0	0	0	0	0	0
1964	0	0.961826817	1.757917111	2.946071202	3.358706767	0	0	0	0	0	0	0
1965	0	0.705260634	1.558152522	2.647900547	3.551777529	1.882165793	0.931789911	0	0	0	0	0
1966	0	0.738820904	1.353018898	2.039333121	1.151295855	0	0	8.070039849	98.71275684	5.415376418	0	0
1967	0	2.089249915	4.11413611	6.633313492	9.259042289	8.5070208	4.304651945	0	16.66078385	4.896613552	0	0
1968	0	0.627086348	2.125560574	3.772683615	5.397443528	3.855690407	0	0	178.1471073	17.30263097	0	0
1969	0	0.090681764	2.539745562	4.667178728	6.949877702	4.415776743	0	4.567508659	0	0	0	0
1970	0	0.157190471	0.296806677	1.309909862	2.395356139	1.433080029	0.429528576	0	0	32.0482146	0	0
1971	0.337698912	2.926998066	4.633433524	7.561790129	10.17007594	4.82965525	3.810632068	41.22736635	10.65275456	61.00442479	2.844790626	0

Figura 31: Tabla de escurrimientos naturales

4.3.3 Resultado 3: Posibilidad de salvar proyectos diseñados.

Se le denomina proyecto al conjunto de elementos diseñados, imagen de fondo y los datos recogidos durante la elaboración del mismo, como coordenadas de ubicación de los componentes, etc... En la Figura 32 se especifican las opciones del menú archivo para crear, cargar o guardar un proyecto; así como la manera en la que un proyecto nuevo es guardado en el directorio deseado. Los proyectos son almacenados en archivos XML.

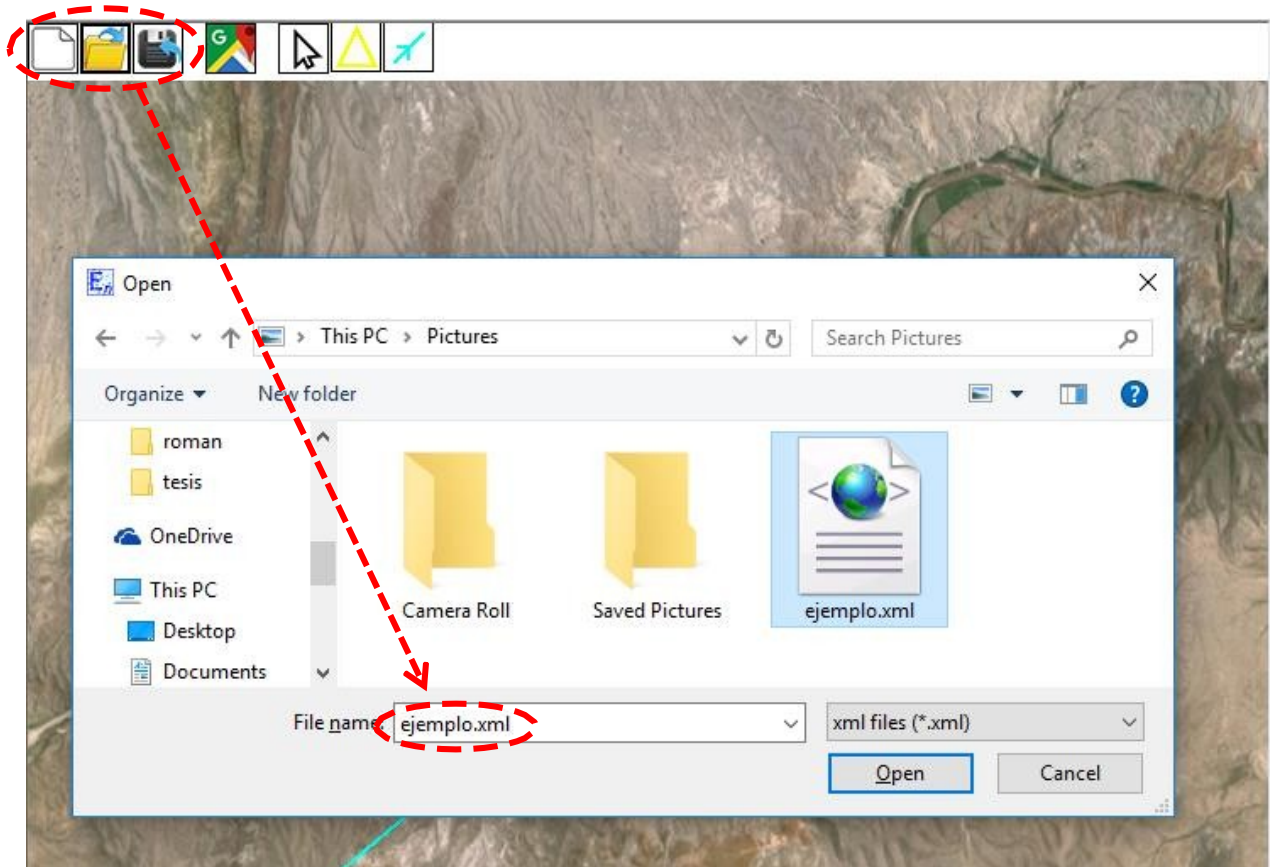


Figura 32: Persistencia en el tiempo de los proyectos

Los archivos XML fueron diseñados con la estructura necesaria para guardar toda la información contenida en un proyecto. La Figura 33 se encarga de mostrar un ejemplo de dicho contenido donde se observan los puntos de medición y sus coordenadas, así como las características como color y grosor. También se ve un ejemplo de cómo es guardada la imagen de fondo como una cadena de caracteres.

```

<project>
  <direction>True</direction>
  <cauce pen_width="2" pen_color="-65536">
    <point percentage_x="34.8891481913652" percentage_y="64.9382207578254" />
    <point percentage_x="49.9416569428238" percentage_y="49.9464579901153" />
    <point percentage_x="64.9941656942824" percentage_y="34.9546952224053" />
  </cauce>
  <medition_points pen_width="2" pen_color="-65536">
    <panel location_x="284" location_y="379" width="30" height="30" percentage_x="33.1388564760793" per
    <panel location_x="542" location_y="197" width="30" height="30" percentage_x="63.2438739789965" per
  </medition_points>
  <recervoirs pen_width="2" pen_color="-65536">
    <panel location_x="413" location_y="288" width="30" height="30" percentage_x="48.1913652275379" per
  </recervoirs>
  <form_data basin_type="7" selected_tab_index="0" initial_date="2016-11" final_date="2016-11">
    <imports>True</imports>
    <exports>True</exports>
    <extractions>True</extractions>
    <public_urban>True</public_urban>
    <industrial>True</industrial>
    <agricultural calculate_irrigation_return="False" known_irrigation_return="False">True</agricultura
    <up_stream_units>2</up_stream_units>
    <down_stream_units>2</down_stream_units>
    <exports_units>2</exports_units>
    <imports_units>2</imports_units>
    <extractions_units>2</extractions_units>
    <public_urban_units>2</public_urban_units>
    <industrial_units>2</industrial_units>
    <agricultural_units>2</agricultural_units>
    <others_units>2</others_units>
  </form_data>
  <image_background>iVBORw0KGgoAAAANSUHEUgAAA1kAAAJFCAYAAACNLxyaAAAAAXNSR0IArs4c6QAAAAARnQU1BAACxjwv8YQU
P4/8G+9Gad77UX7n/ajKezdq7rwb9fc+jPo73Nv1X0XxFz+Pkiu/irJr70fd3QvRWXEzuqvzoqvqjQVX4nagktpq+d9f2tJjPRURWV
8XznqCdu7u9+i9TJ0Z7m9LpOHT3bXYmH1Lnt7tf+4ZzPvj+gvP1s/XXbZN+FMd5PDNJfTNNvzMba7FjsLE7Hwep87C3P8p/520eZWff
JjujseJGNFTeoF8fiKb6e3Hn1kdrXHQpytBud29/HJ1oh/nJ7jjamInHR2txn+057Vvn54Zo1zxx+2rKb3GS/g2t0oOecLOPsm4s8d3
  </image_background>

```

Figura 33: Contenido de archivo XML



4.4 Resultados del Objetivo específico 3.

Evaluar la calidad del software.

4.4.1 Resultado 1: Listado de errores.

En todo desarrollo de software una de las etapas más importantes es la fase de pruebas. Esta se planea durante el análisis y diseño y se ejecuta una vez finalizado el desarrollo de las primeras versiones funcionales del producto. Su principal objetivo es la detección de posibles fallas o errores que comúnmente suelen suceder y su principal logro es la obtención de un software con más calidad. En este trabajo, teniendo en cuenta que ya existe una solución que realiza los mismos cálculos y que la complejidad algorítmica no es alta ni extensa, se decide realizar solo pruebas de caja negra y regresión para verificar el correcto cumplimiento de cada uno de los requisitos. Se utiliza la solución aportada por el Dr. Silva implementada sobre documentos Excel para comparar los resultados. Este epígrafe está dedicado a mostrar las pruebas realizadas y los resultados arrojados; así como el proceder en caso de errores.

La mayoría de los requisitos relacionados con la interfaz de usuario ya fueron probados a prueba y error demostrando su correcto funcionamiento durante la etapa de desarrollo. Sin embargo hubo cambios bruscos en el diseño de la interfaz por lo que se hace necesario la aplicación de pruebas.

Prueba 1: Selección del tipo de cuenca.

Objetivo: Verificar la posibilidad que se le brinda al usuario de escoger el tipo de cuenca a analizar de entre los tipos comprendidos por el software.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 2: Selección de imagen de fondo.



Objetivo: Verificar la posibilidad que se le brinda al usuario de importar la imagen de fondo que desee para el panel de diseño.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 3: Selección de imagen de fondo.

Objetivo: Verificar la posibilidad que se le brinda al usuario de importar la imagen de fondo que desee para el panel de diseño.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 4: Propuesta de diseño de cuencas.

Objetivo: Verificar que, en dependencia del tipo de cuenca seleccionado por el usuario, el software en automático cree una propuesta de diseño de cuenca con los elementos mínimos obligatorios del caso escogido; así como la modificación del mismo de ser posible.

Errores encontrados:

1. Las líneas que representan el cauce no muestran el sentido en el que fluye el agua.

Corrección: Se implementó algoritmo para dibujar cabezas de flechas entra cada elemento del diseño que representan el sentido en que fluye el agua.

Prueba 5: Creación de nuevos elementos del diseño.

Objetivo: Verificar la posibilidad de agregar nuevos elementos al diseño propuesto.



Errores encontrados:

1. Al agregarse en automático las líneas que representan el cauce y conexión entre los elementos, los que eran agregados por los usuarios eran colocados fuera de los límites del tramo del cauce propuesto por el software. Esto rompe la estructura obligatoria que define el tipo de cuenca escogido.

Corrección: Se modificó algoritmo de creación de líneas de manera tal que los nuevos elementos agregados fuesen ubicados en un punto intermedio del cauce.

Prueba 6: Eliminación de elementos del diseño.

Objetivo: Verificar la posibilidad de eliminar elementos no obligatorios del diseño.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 7: Movimiento de ubicación elementos dentro del panel.

Objetivo: Verificar la posibilidad de cambiar la ubicación de los elementos dentro del panel para colocarlos sobre su posición relativa al mapa de la imagen de fondo.

Errores encontrados:

1. Se detectó que al mover elementos era posible ubicarlos encima o debajo de otros.

Corrección: Se implementó algoritmo de validación que rechaza la nueva ubicación, en el caso no permitido, y lo envía a la ubicación anterior mostrando el mensaje de error correspondiente.



Prueba 8: Personalización de los elementos del diseño.

Objetivo: Verificar la posibilidad de cambiar el tamaño, color y grosor de los elementos del diseño.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 9: Persistencia de los proyectos.

Objetivo: Verificar la posibilidad de crear, modificar y guardar los proyectos trabajados en formato XML.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 10: Generación de formato de entrada de datos.

Objetivo: Verificar la posibilidad de generar formato en Excel con las columnas y filas necesarias para la entrada de los registros históricos.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 11: Importación de entrada de datos.

Objetivo: Verificar la posibilidad de importar los datos llenados en el formato Excel previamente generado.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 12: Cálculo de retorno de irrigación y escurrimiento natural.

Objetivo: Verificar la veracidad de los resultados arrojados por el software.



Errores encontrados:

1. Redondeo inoportuno de los números calculados y por lo tanto falta de precisión.

Corrección: Cambio del tipo de dato numérico de double a decimal.

Prueba 13: Generación de gráficas.

Objetivo: Verificar la generación de gráficas de tipo hidrograma donde se le muestre al usuario la relación en el tiempo del promedio de los escurrimientos calculados.

Errores encontrados: Ninguno

Prueba 14: Internacionalización.

Objetivo: Validar el uso de los idiomas español e inglés en los textos mostrados por el software, en dependencia del idioma configurado en el sistema operativo.

Errores encontrados:

1. Con un sistema operativo en inglés el mensaje que indica que un elemento está demasiado cerca de otro, en el momento de insertarlo en el panel de diseño, aparece en español.

Corrección: Incorporación del texto del mensaje en ambos diccionarios.



4.4.2 Resultado 2: Software robusto y amigable.

Luego de ser abarcados todos los requisitos definidos en este trabajo y aplicado pruebas para verificar el correcto funcionamiento del software para cada uno de ellos, es posible afirmar que el software cumple con las expectativas del cliente de manera robusta y amigable.



CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.



5.1 Conclusiones

En este trabajo ha concluido de manera satisfactoria. Se logró el desarrollo del software para el Cálculo de Esguerrimiento Natural (CEN). Se utilizó una metodología de desarrollo de software adaptada a la situación que, dado que sólo trabajó una persona en el proyecto, fueron tomadas algunas características de diferentes metodologías permitiéndole ser más ágil y terminar en tiempo.

Se realizó un minucioso análisis de la situación previa a la existencia del software. Fueron identificados los problemas existentes. Se estudiaron las posibles soluciones de software que pudieran resolver los problemas que existían, las cuales fueron descartadas como soluciones debido a que no implementan el modelo del Dr. Silva. Sin embargo aportaron técnicas y estrategias muy importantes. Fueron diseñadas tres metodologías para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados. Se identificaron los requisitos que debían cumplir el software, así como la propuesta inicial de prototipo de interfaz no funcional principal; dando cumplimiento al objetivo específico 1.

Como dicta la metodología 2 y dando cumplimiento al objetivo específico 2, se realizaron las actividades correspondientes, obteniendo una primera versión funcional del software que dio cumplimiento a todos los requerimientos identificados. Se garantizó la persistencia en el tiempo de los proyectos realizados en el software, permitiendo guardarlos en archivos XML, los cuales son portables y de fácil distribución. También se logró la generación de gráficas dinámicas para el análisis estadístico de los esguerrimientos naturales calculados y la internacionalización.

Fueron aplicadas un total de 14 pruebas, las cuales arrojaron una mínima cantidad de errores y estos a su vez fueron corregidos, sirviendo de retroalimentación. Con esto se logró la robustez y amigabilidad esperada.



Por lo anteriormente expuesto se concluye que tanto el objetivo general de este trabajo como la hipótesis fueron cumplidos.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda hacer uso de este software para el cálculo de escurrimientos naturales en cuencas superficiales. Especialmente en las que cuentan con extracciones para actividades agrícolas, ya que es en estos casos donde se tiende a obtener resultados físicamente imposibles al ser calculados de la manera tradicional, debido al retorno de irrigación, difícil de medir, que regresa al cauce. Además, se aconseja hacer uso del mismo en cuencas de las cuales se cuente con registros que daten desde más de 20 años porque a mayor cantidad de históricos, más preciso es el modelo aplicado a la hora de dar un resultado. En cuencas donde existan pocos registros o no se realicen extracciones este producto no es de gran utilidad.

5.3 Trabajo a futuro

Implementar estrategia dinámica para la importación de diccionarios de frases y palabras para permitir a los usuarios importar cualquier lenguaje. De esta forma no estaría limitada la internacionalización a solo inglés y español, sino que se haría infinita.

Trabajar en la optimización de los algoritmos implementados para lograr un menor tiempo de respuesta en la generación de salidas.



Bibliografía

- Ashok, M., Chandranath, C., Prachi Pratyasha, J., R, S., & Arun, K. (2015). Identification of the best multi-model combination for simulating river discharge. *ScienceDirect*, 313-325.
- B.J.M Goes, S.E. Howarth, R.B. Wardlaw, I.R. Hancock, & U.N. Parajuli. (2015). Integrated Water Resources Management in an Insecure River Basin: A case study of Helmand River Basin, Afghanistan. *International Journal of Water Resources Development*, doi:10.1080/07900627.2015.1012661.
- Chandra Nayak, P., Wardlaw, R., & Kharya, A. (2015). Water Balance Approach to Study the Effect of Climate Change on Groundwater Storage for Sirhind Command Area in India. *International Journal of Water Resources Development*, doi:10.1080/15715124.2015.1012206.
- Karlberg, L., Hoff, H., Amsalu, T., Andersson, K., Binnington, T., Flores-López, F., y otros. (2015). Tackling Complexity: Understanding the Food-Energy-Environment Nexus in Ethiopia's Lake Tana Sub-basin. *Water Alternatives*.
- Matchett, E. L., Fleskes, J. P., Young, C. A., & Purkey, D. R. (2015). A Framework for Modeling Anthropogenic Impacts on Waterbird Habitats: Addressing future uncertainty in conservation planning. *USGS*.
- Microsoft. (n.d.). *Graphics Class (System.Drawing)*. Retrieved from [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.drawing.graphics\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.drawing.graphics(v=vs.110).aspx)



- NA, A., Shah Alam, M., PM, A., ARA, R., & ZM, Y. (2014). Climate variability and anthropogenic impacts on a semi-distributed monsoon catchment runoff simulations. *IEEE Explorer*, 178-183.
- Njeri Ngugi, H. (2015). Evaluation of Impacts of Water, Sanitation and Hygiene (WASH) Activities to the Environment in the Upper Mara Basin Using the WEAP Model. *Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology*.
- Quentin, W. (s.f.). The Río San Juan Pilot Study - A WEAP Application," Proceedings of the 22nd Annual Water Resources Planning and Management Division Conference. *ASCE, Integrated Water Resources Planning for the 21st Century, Cambridge, MA,*.
- Silva Hidalgo, D., López Corzo, M., García Servín, M., & Verduzco Cedeño, M. (2014). *Determinación conjunta de escurrimientos naturales restituidos, retornos de irrigación y volumen neto de pérdidas y ganancias en la cuenca del río Bravo (parte mexicana), para el periodo de 1950 al año 2008*. Nuevo León.
- Silva Hidalgo, H. (2010). *MODELO MATEMÁTICO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROLÓGICAS*. Chihuahua.
- Software: *EPANET | Drinking Water Research | US EPA*. (s.f.). Obtenido de <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>
- Suk-Hwan, J., & Sun-Woong, J. (2012). Flood routing simulation for dam failure time estimation. *IEEE Explorer*, 167 - 169.
- WaterCAD and WaterGEMS | Water Simulation*. (s.f.). Obtenido de <http://www.water-simulation.com/wsp/2005/02/21/watercad-and-watergems/>
- CSERC. (n.d.). What is a watershed and what does it consists of? Retrieved from



<http://www.cserc.org/sierra-fun/games/watershed-game/>

IST-CI. (2015). Hay que detener la contaminación del agua | Izquierda Socialista de los Trabajadores LIT-CI. Retrieved from <http://www.ist.uy/node/85>

Oregon Hikers • View topic - Another Goat Rocks report 8.13-14.2010. (2008). Retrieved from <http://www.oregonhikers.org/forum/viewtopic.php?f=8&t=5861>

Protecting Watersheds - Western Watersheds Project. (n.d.). Retrieved from <https://www.westernwatersheds.org/issues/issuesprotecting-watersheds/>

runoff - National Geographic Society. (n.d.). Retrieved from <http://nationalgeographic.org/encyclopedia/runoff/>

U.S. Department Of The Interior. (n.d.). Cle Elum Pool Raise, PN Region. Retrieved from <http://www.usbr.gov/pn/programs/eis/cleelumraise/>

University of Hertfordshire. (2011). ARCHIVE: Cross Compliance Guidance for Soil Management 2010 Edition (PB13315) - Runoff and erosion. Retrieved from <http://adlib.eversite.co.uk/adlib/defra/content.aspx?doc=262248&id=262258>

WEAP: Water Evaluation And Planning System. (s.f.). Obtenido de <http://www.weap21.org/>



Anexos

Anexo 1: Clase gráfica

```
public Hydrograph(decimal[,] monthly_average)
{
    InitializeComponent();
    chart_hydrograph_monthly.ChartAreas[0].AxisY.Title = i18n.units[2];

    for (int i = 0; i < monthly_average.GetLength(1); i++)
        chart_hydrograph_monthly.Series[0].Points[i].YValues[0] =
            (double)(monthly_average[1, i] > 0 ? monthly_average[0, i] / monthly_average[1, i] : 0);
    this.Text = i18n.hydrograph;
    chart_hydrograph_monthly.Series[0].Name = i18n.runoff + 1;

    for (int i = 2; i < monthly_average.GetLength(0); i++)
    {
        chart_hydrograph_monthly.Series.Add(i18n.runoff + i);
        chart_hydrograph_monthly.Series[i - 1].ChartType = chart_hydrograph_monthly.Series[0].ChartType;

        for (int j = 0; j < monthly_average.GetLength(1); j++)
        {
            chart_hydrograph_monthly.Series[i - 1].Points.Add(
                chart_hydrograph_monthly.Series[0].Points[j].Clone());
            chart_hydrograph_monthly.Series[i - 1].Points[j].YValues[0] =
                [(double)(monthly_average[1, j] > 0 ? monthly_average[i, j] / monthly_average[1, j] : 0)];
        }
    }
}
```

Anexo 2: Método para poner imagen de fondo

```
public void SetImageBackground(Control control, Image image)
{
    var destRect = new Rectangle(0, 0, control.Width, control.Height);
    var destImage = new Bitmap(control.Width, control.Height);

    destImage.SetResolution(image.HorizontalResolution, image.VerticalResolution);

    using (var graphics = Graphics.FromImage(destImage))
    {
        graphics.CompositingMode = CompositingMode.SourceCopy;
        graphics.CompositingQuality = CompositingQuality.HighQuality;
        graphics.InterpolationMode = InterpolationMode.HighQualityBicubic;
        graphics.SmoothingMode = SmoothingMode.HighQuality;
        graphics.PixelOffsetMode = PixelOffsetMode.HighQuality;

        using (var wrapMode = new ImageAttributes())
        {
            wrapMode.SetWrapMode(WrapMode.TileFlipXY);
            graphics.DrawImage(image, destRect, 0, 0, image.Width, image.Height, GraphicsUnit.Pixel, wrapMode);
        }
    }

    control.BackgroundImage = destImage;
}
```


Anexo 3: Método para validar que los elementos no estén superpuestos

```
public bool isPaintedNearAnother(Point mouse_location, string element_panel_name = "")
{
    //verify if painted near another
    for (int i = 0; i < splitContainer2.Panel2.Controls.Count; i++)
    {
        switch (splitContainer2.Panel2.Controls[i].GetType().ToString())
        {
            case "SMMDA.MeditationPointPanel":
            case "SMMDA.ReservoirPanel":
                int panel_x = splitContainer2.Panel2.Controls[i].Location.X;
                int panel_y = splitContainer2.Panel2.Controls[i].Location.Y;
                if (
                    (element_panel_name == "" ||
                     element_panel_name != splitContainer2.Panel2.Controls[i].Name)
                    &&
                    (isInRectangle(mouse_location.X - (initial_rectangles_width / 2),
                                   mouse_location.Y - (initial_rectangles_height / 2),
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Location,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Width,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Height) ||
                     isInRectangle(mouse_location.X + (initial_rectangles_width / 2),
                                   mouse_location.Y - (initial_rectangles_height / 2),
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Location,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Width,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Height) ||
                     isInRectangle(mouse_location.X - (initial_rectangles_width / 2),
                                   mouse_location.Y + (initial_rectangles_height / 2),
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Location,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Width,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Height) ||
                     isInRectangle(mouse_location.X + (initial_rectangles_width / 2),
                                   mouse_location.Y + (initial_rectangles_height / 2),
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Location,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Width,
                                   splitContainer2.Panel2.Controls[i].Height))
                )
                {
                    MessageBox.Show(ilBn.error_too_near, "Error");
                    return true;
                }
                break;
            case "SMMDA.Cauce":
                break;
        }
    }
    return false;
}
```

Anexo 4: Método para validar que los elementos no estén superpuestos

```
private void insert_control(int x, int y, bool is_meditation_point, int terminal_type = 0)
{
    int order = 0;
    x -= (initial_rectangles_width / 2);
    y -= (initial_rectangles_height / 2);
    double percentage_x = (double)x * 100 / splitContainer2.Panel2.Width;
    double percentage_y = (double)y * 100 / splitContainer2.Panel2.Height;
    ElementPanel panel;
    if (is_meditation_point)
    {
        panel = new MeditationPointPanel(
            new Point(x, y)
            , new Size(initial_rectangles_width, initial_rectangles_height)
            , percentage_x
            , percentage_y
            , initial_percentage_width
            , initial_percentage_height
            , "Panel" + (splitContainer2.Panel2.Controls.Count + 1)
        );
        rectangles_count++;
    }
    else
    {
        panel = new ReservoirPanel(
            new Point(x, y)
            , new Size(initial_rectangles_width, initial_rectangles_height)
            , percentage_x
            , percentage_y
            , initial_percentage_width
            , initial_percentage_height
            , "Panel" + (splitContainer2.Panel2.Controls.Count + 1)
        );
        triangles_count++;
    }
    switch (splitContainer2.Panel2.Controls.Count)
    {
        case 0:
            lines.Add(panel.getCenterPointPercentage());
            break;
        case 1:
            order = 1;
            lines.Add(panel.getCenterPointPercentage());
            break;
        default:
            if (is_meditation_point)
                if
                (splitContainer2.Panel2.Controls[splitContainer2.Panel2.Controls.Count - 1] is
                ReservoirPanel)
                {
                    order = 2;
                    lines.Add(panel.getCenterPointPercentage());
                }
                else
                {
                    for (int i = 0; i < splitContainer2.Panel2.Controls.Count;
                    i++)
                    ((ElementPanel)splitContainer2.Panel2.Controls[i]).order++;
                }
            }
    }
}
```



```
        lines.Insert(0, panel.getCenterPointPercentage());
    }
    else
    {
        for (int i = 0; i < splitContainer2.Panel2.Controls.Count; i++)
        {
            if (((ElementPanel)splitContainer2.Panel2.Controls[i]).order
== splitContainer2.Panel2.Controls.Count - 1)
            {
                ((ElementPanel)splitContainer2.Panel2.Controls[i]).order++;
                lines.Add(lines[splitContainer2.Panel2.Controls.Count -
1]);
                order = splitContainer2.Panel2.Controls.Count - 1;
                lines[splitContainer2.Panel2.Controls.Count - 1] =
panel.getCenterPointPercentage();
                break;
            }
        }
        splitContainer2.Panel2.Refresh();
    }
    break;
}
panel.order = order;
panel.Terminal_tiype = terminal_type;
splitContainer2.Panel2.Controls.Add(panel);
//update_visual_elements_options();
set_changed_project(true);
}
```