



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

POSGRADO EN HIDROCIENCIAS

**DINÁMICA HIDROLÓGICA  
DE LA CUENCA SAN MARCOS:  
UN ENFOQUE TERMODINÁMICO**

**METZLI ILEANA ALDRETE LEAL**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2018



CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y  
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, "**METZLI ILEANA ALDRETE LEAL**", Alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor "**DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ**", por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis "**DINÁMICA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA SAN MARCOS: UN ENFOQUE TERMODINÁMICO**", y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 11 de julio de 2018



---

Firma del  
Alumno (a)




---


DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ  
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis


La presente tesis, titulada: **Dinámica Hidrológica de la cuenca San Marcos: un enfoque termodinámico**, realizada por la alumna: **Metzli Ileana Aldrete Leal**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO   
Mario R. Martínez Menez

ASESOR   
Demetrio S. Fernández Reynoso

ASESOR   
Gustavo A. Arévalo Galarza

Montecillo. Texcoco, México. Julio de 2018



## DINÁMICA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA SAN MARCOS: UN ENFOQUE TERMODINÁMICO

**Metzli Ileana Aldrete Leal, M. en C.**  
**Colegio de Postgraduados, 2018**

### RESUMEN

La importancia de conocer el comportamiento y la distribución de los recursos hídricos, es crucial en la implementación de políticas de gestión sustentable para su uso y aprovechamiento. El objetivo de la investigación fue determinar la aplicabilidad y eficiencia del enfoque termodinámico REW (*Representative Elementary Watershed*) para estimar los escurrimientos diarios y mensuales en la cuenca San Marcos.

La calibración del modelo se realizó para el periodo de 1980-1998 y la validación para el 2000-2014. La cuenca se dividió en 25 unidades REW, a cada una, se aplicó un enfoque termodinámico que considera el equilibrio de masa, momento, energía y entropía de los volúmenes de control hidrológicamente homogéneos utilizando las ecuaciones de conservación de masa y momento para simular los flujos insaturado, saturado, superficial saturado, concentrado y de cauces. Se ajustaron los parámetros para estimar los escurrimientos diarios y mensuales y compararlos con los observados en ambos periodos.

Los resultados muestran que en el periodo de calibración los escurrimientos estimados se ajustaron a los observados con índices de  $NSE_d=0.67$ ,  $NSE_m=0.87$  y  $r^2_d=0.72$ ,  $r^2_m=0.90$  y para la validación de  $NSE_d=0.57$ ,  $NSE_m=0.61$  y  $r^2_d=0.74$ ,  $r^2_m=0.78$ , lo que indica que el modelo REW estima con precisión los escurrimientos a nivel diario y mensual y puede ser utilizado para la predicción hidrológica en cuencas.

**Palabras clave:** escurrimientos, modelación, eficiencia Nash-Sutcliffe, elementos básicos representativos, subregiones



## HYDROLOGICAL DYNAMICS OF THE SAN MARCOS WATERSHED: A THERMODYNAMIC APPROACH

**Metzli Ileana Aldrete Leal, M. en C.**

**Colegio de Postgraduados, 2018**

### ABSTRACT

The importance of knowing the behavior and distribution of water resources is crucial in the implementation of sustainable management policies for their use and exploitation. The objective of this research was to determine the applicability and efficiency of the thermodynamic approach REW (*Representative Elementary Watershed*) to estimate the daily and monthly discharge in the San Marcos watershed.

The calibration of the model was made from 1980-1998 and the validation from 2000-2014. The basin was divided into 25 REWs and a thermodynamic approach was applied to each one, it considers mass, momentum, energy and entropy balance of the hydrologically homogeneous control volumes using mass and momentum conservation equations to simulate the unsaturated flow, saturated flow, saturated overland flow, concentrated overland flow and channel flow. The parameters were adjusted to estimate the daily (d) and monthly (m) discharges and compare them with those observed in both periods.

The results show that for calibration, the simulated discharges adjusted to those observed with  $NSE_d = 0.67$ ,  $NSE_m = 0.87$  and  $r^2_d = 0.72$ ,  $r^2_m = 0.90$  and for validation of  $NSE_d = 0.57$ ,  $NSE_m = 0.61$  and  $r^2_d = 0.74$ ,  $r^2_m = 0.78$ , which indicates that the REW model accurately estimates discharge on a daily and monthly basis and can be used for hydrological prediction in watersheds.

**Keywords:** discharge, modeling, Nash-Sutcliffe efficiency, representative elementary watersheds, subregions



## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, a Dios por haberme permitido cumplir este paso tan importante en mi vida, además de premiarme con una familia, un novio y un grupo de amigos excepcionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para realizar la maestría.

Al Colegio de Postgraduados que me dio las bases para desarrollarme durante el postgrado, por brindarme las herramientas necesarias y numerosas oportunidades durante ese periodo y sobre todo por haberme permitido cumplir otra de mis metas personales.

A mi Profesor Consejero, el Dr. Mario Martínez Menez, quien además de orientarme adecuadamente durante el desarrollo de esta tesis, me brindó su confianza y apoyo para llevar a cabo un trabajo novedoso. Gracias de igual manera por ofrecerme su amistad.

Al Dr. Demetrio Fernández Reynoso por el tiempo dedicado, acertadas sugerencias, gran disposición y valiosas aportaciones a este trabajo de investigación. Por compartir sus conocimientos y su apoyo en campo.

Al Dr. Gustavo Arévalo Galarza, quien además de guiarme en este trabajo me brindó en todo momento su apoyo profesional y personal. Le agradezco el valioso tiempo y esfuerzo dedicado así como su comprensión, amistad y gratos momentos de buen humor.

Al Ing. Carlos Palacios Espinoza, muchas gracias por el constante apoyo técnico desde que inició mi proyecto de investigación y hasta su culminación.

Al Prof. Dr. Ing. Paolo Reggiani, por hacer de mi estancia en la Universidad de Siegen, Alemania, una de las mejores experiencias académicas. Por su amplia disponibilidad para el trabajo con el modelo REW, así como la integración con su equipo de trabajo.

Al Dr. Oleksiy Boyko por apoyarme en el aspecto técnico de programación y el desarrollo de códigos que utilicé para realizar la modelación hidrológica.

A mis padres que me han impulsado para contar con los grandes logros que he realizado en la vida, por apoyarme en todos mis planes y confiar en que siempre lograré mis propósitos, por inculcarme valores como fortaleza, humildad, responsabilidad y perseverancia, a ser constante y dedicada...a ustedes, que me brindan su gran comprensión y amor en todo momento, por motivarme para seguir adelante, gracias.

A mi familia, mis abuelitos, tíos, primos y sobrinos, por estar conmigo en cada paso que doy. En especial a mis primas: Gaby, Pau, Dany y Fer; Ximena, Alexa y todas las demás, gracias por los momentos divertidos y geniales en familia...las quiero mucho.



A todas aquellas personas que me brindan su amistad sin reservas, que siempre están para mí cuando los necesito, por ser mi apoyo constante y regalarme tantos años de momentos geniales. A mis mejores amigos, Annia M., Eugenia Á., Viviana A., Fernando S., Francisco S., Moisés M., Jorge M., Jannet B., Yared C., Héctor C., Erick G., Oscar G., Betsaida V., Rodolfo A., Uriel C., Javier C.

Por último, a mi grupo de amigos en el área de Manejo Integral de Cuencas, a Mariela, por su constante apoyo administrativo y personal, Madaí, Diana, Cristián, Madgalena y Carlos, por hacer muy ameno el trabajo en los últimos meses.



## DEDICATORIA

Al ponerle fecha a un sueño, se convierte en una meta...una meta, dividida en pasos, se convierte en un plan...y un plan, apoyado por acciones, se vuelve **realidad**. El éxito no es fruto de una sola persona, por ello, quisiera agradecer de corazón y dedicar este gran logro con todo mi cariño a todas las personas que lo hicieron posible.

A mis padres Paty Leal Santamaría y Arnulfo Aldrete por brindarme su apoyo incondicional, aceptar mis decisiones, confiar en mí, proporcionarme su cariño, amor y ser mi modelo a seguir, solo gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy; espero que este paso más para mí, represente un gran orgullo para ustedes, los quiero mucho.

A mis abuelitos, Ana María Aldrete (†), siempre llevaré en mi corazón los mejores recuerdos tuyos, te convertiste en un gran ángel que me cuida y guía mis pasos ahora desde el cielo; Andrés y Socorro, por ser los pilares de la familia y siempre demostrarme un gran cariño.

Al amor de mi vida, Fernando Sánchez López, por todo su amor, confianza y constante apoyo, por los increíbles momentos que hemos compartido y por traer tanta felicidad a mi vida. ¡Te amo!



*¿Cómo podrían las gotas de agua saber que se convertirán en un río? Sin embargo, el río despreocupado fluye.*

*- Antoine de Saint-Exupery -*

*En el conflicto entre el río y la roca, el río siempre gana, no por fuerza, sino por perseverancia.*

*- H.J. Brown -*

*Meter tus manos en un río, es sentir las cuerdas que unen a la tierra.*

*- Laura Gilpin -*





## CONTENIDO

RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
LISTA DE CUADROS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. JUSTIFICACIÓN .....	4
3. OBJETIVOS .....	6
3.1. General .....	6
3.2. Particulares .....	6
4. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS .....	7
4.1. Hipótesis .....	7
4.2. Supuestos .....	7
5. REVISIÓN DE LITERATURA .....	8
5.1. El ciclo hidrológico y la energía .....	8
5.2. Sistemas hidrológicos .....	10
5.3. El proceso de modelado y simulación .....	12
5.4. Clasificación de los modelos hidrológicos .....	15
5.5. Modelos de simulación hidrológica a nivel de cuenca .....	18
5.6. Modelos de simulación en México .....	20
5.7. Enfoque REW ( <i>Representative Elementary Watershed</i> ) .....	22
5.7.1. Antecedentes del enfoque termodinámico .....	29
5.8. Estructura del modelo REW .....	30
5.8.1. Análisis de la cuenca TAUDEM .....	31
5.8.1.1. Insumos meteorológicos requeridos .....	33
5.8.1.2. Serie temporal en formato NetCDF .....	34
5.8.2. Análisis REW/REC .....	35
5.8.3. Preprocessor .....	35
5.8.3.1. Archivo de parámetros del preprocesador .....	36
5.8.3.2. Archivos de condiciones iniciales y finales .....	36
5.8.4. Solver .....	37



5.8.5. Postprocessor .....	37
5.9. Calibración y validación de modelos.....	38
5.10. Eficiencia predictiva de modelos.....	39
6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	41
6.1. Localización.....	41
6.2. Fisiografía y Geología.....	42
6.3. Edafología .....	44
6.4. Uso del suelo.....	47
6.5. Clima .....	50
6.6. Hidrología superficial .....	53
7. MATERIALES Y MÉTODOS .....	56
7.1. Materiales .....	56
7.1.1. Información biofísica .....	56
7.1.2. Información meteorológica.....	56
7.1.3. Información hidrométrica.....	56
7.1.4. Instrumental para salida de campo .....	57
7.1.5. Hardware y Software.....	57
7.2. Metodología.....	58
7.2.1. Preprocesamiento de información.....	58
7.2.1.1. Preparación de datos meteorológicos .....	58
7.2.1.2. Análisis e imputación de datos .....	62
7.2.1.3. Asignación de uso de suelo.....	63
7.2.1.4. Valores de los coeficientes de rugosidad .....	64
7.2.2. Aplicación del modelo termodinámico REW.....	65
7.2.2.1. Creación de los directorios de trabajo .....	65
7.2.2.2. Instalación de los ejecutables y archivos del proyecto .....	65
7.2.2.3. Ejecución del paquete TAUDEM .....	66
7.2.2.4. Definición y uso de centroides.....	66
7.2.2.5. Almacenamiento de serie temporal .....	67
7.2.2.6. Ejecución del análisis REW/REC .....	68
7.2.2.7. Ejecución del paquete Preprocessor .....	69
7.2.2.8. Ejecución del paquete Solver .....	69



7.2.3. Calibración del modelo.....	70
7.2.4. Validación del modelo .....	70
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
8.1. Definición de unidades REW .....	71
8.2. Parámetros morfométricos de la cuenca .....	72
8.3. Calibración y validación del modelo.....	73
8.3.1. Calibración de escurrimientos a nivel diario .....	73
8.3.2. Calibración de escurrimientos a nivel mensual .....	74
8.3.3. Validación de escurrimientos a nivel diario .....	76
8.3.4. Validación de escurrimientos a nivel mensual.....	79
8.4. Eficiencia del modelo REW .....	81
9. CONCLUSIONES.....	83
10. RECOMENDACIONES .....	84
11. LITERATURA CITADA.....	85
12. ANEXOS .....	95



## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Resumen de propiedades para ecuaciones de balance. ....	23
<b>Cuadro 2.</b> Funciones del archivo de parámetros del preprocesador .....	36
<b>Cuadro 3.</b> Valores de referencia del coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	39
<b>Cuadro 4.</b> Cobertura y uso del suelo de la cuenca San Marcos.....	48
<b>Cuadro 5.</b> Descripción de unidades climáticas de la cuenca San Marcos.....	50
<b>Cuadro 6.</b> Clases de uso asignadas para la cuenca San Marcos. ....	63
<b>Cuadro 7.</b> Morfometría de la cuenca San Marcos. ....	72
<b>Cuadro 8.</b> Parámetros utilizados para la calibración del modelo REW.....	73
<b>Cuadro 9.</b> Evaluación de la eficiencia predictiva del modelo REW. ....	81



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Almacenamientos (rectángulos) y flujos (flechas) del agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico. ....	8
<b>Figura 2.</b> Proceso de modelado .....	13
<b>Figura 3.</b> Métodos de simulación hidrológica. ....	14
<b>Figura 4.</b> Representación gráfica de modelos hidrológicos. ....	16
<b>Figura 5.</b> Clasificación de modelos hidrológicos.....	17
<b>Figura 6.</b> Herramientas de evaluación ambiental y aplicación de modelos a escala múltiple .....	19
<b>Figura 7.</b> Ilustración esquemática de los dominios del modelo y sus procesos asociados .....	25
<b>Figura 8.</b> Organización jerárquica de unidades REW.....	26
<b>Figura 9.</b> Vista en tercera dimensión de un conjunto de REWs. ....	27
<b>Figura 10.</b> Dominios o zonas del modelo representadas en sección transversal de una unidad REW .....	29
<b>Figura 11.</b> Procesamiento llevado a cabo por TauDEM para la obtención de REWs...	31
<b>Figura 12.</b> Codificación de dirección de flujo. ....	32
<b>Figura 13.</b> Dirección de flujo definida como la pendiente descendente más pronunciada sobre las facetas triangulares en un pixel .....	32
<b>Figura 14.</b> Visualización de archivo NetCDF con Panoply .....	35
<b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo de los procesos del módulo Solver.....	37
<b>Figura 16.</b> Ubicación del área de estudio. ....	41
<b>Figura 17.</b> Ciudades principales de la cuenca San Marcos.....	42
<b>Figura 18.</b> Geología de la cuenca San Marcos. ....	43
<b>Figura 19.</b> Edafología de la cuenca San Marcos.....	44
<b>Figura 20.</b> Uso del suelo de la cuenca San Marcos. ....	48
<b>Figura 21.</b> Climas de la cuenca San Marcos.....	51
<b>Figura 22.</b> Climogramas de cuenca San Marcos.....	52



<b>Figura 23.</b> Región hidrológica de la cuenca San Marcos. ....	53
<b>Figura 24.</b> Flujos principales de la cuenca San Marcos. ....	54
<b>Figura 25.</b> Disponibilidad de datos meteorológicos. ....	59
<b>Figura 26.</b> Disponibilidad de datos a partir de 1980. ....	60
<b>Figura 27.</b> Análisis de doble masa para las estaciones seleccionadas. ....	10
<b>Figura 28.</b> Línea de tiempo de estaciones seleccionadas. ....	62
<b>Figura 29.</b> Estimación de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes sitios de muestreo. ....	64
<b>Figura 30.</b> Archivo de texto con información por centroide. ....	67
<b>Figura 31.</b> Script para crear archivo NetCDF. ....	68
<b>Figura 32.</b> Ejecución del módulo Solver. ....	69
<b>Figura 33.</b> Unidades REW generadas por el módulo TAUDEM. ....	71
<b>Figura 34.</b> Escurrecimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel diario (calibración). ....	74
<b>Figura 35.</b> Escurrecimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel mensual (calibración). ....	75
<b>Figura 36.</b> Relación entre escurrecimientos medidos y simulados a nivel mensual por el modelo REW durante el periodo de calibración (1980-1998). ....	76
<b>Figura 37.</b> Escurrecimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel diario (validación). ....	77
<b>Figura 38.</b> Escurrecimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel mensual (validación). ....	79
<b>Figura 39.</b> Relación entre escurrecimientos medidos y simulados a nivel mensual por el modelo REW durante el periodo de validación (2000-2014). ....	80



## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural esencial para el bienestar de los seres humanos, y se mantiene en circulación constante en la superficie de la Tierra, también sirve como medio de transporte de contaminantes a través de los suelos y las redes fluviales, y con frecuencia hay excesos, lo cual causa inundaciones o escasez, produciendo sequías a lo largo del país. La importancia de conocer el comportamiento y la distribución de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas, es crucial en la implementación de políticas de manejo sustentable para el uso y aprovechamiento del agua.

La modelación hidrológica es una herramienta de ayuda que permite entender y evaluar los procesos del ciclo del agua en las cuencas hidrológicas, para identificar las ventajas y desventajas de las acciones antrópicas sobre los ecosistemas y sus impactos sobre los recursos hídricos. Uno de los objetivos de los modelos hidrológicos es el tratar de reproducir el fenómeno lluvia-escurrimiento en una cuenca, para determinar la cantidad y distribución de los escurrimientos en el tiempo, es por ello que el desarrollo, calibración, validación y uso de modelos hidrológicos es muy importante para conocer los volúmenes agua disponibles para la toma de decisiones sobre su uso y manejo en apoyo a la sociedad.

La modelación en general ha tenido dos tipos diferentes de enfoques: 1) el análisis distribuido de los parámetros basado en procesos físicos, que tiene su fundamento en el proyecto original presentado por Freeze y Harlan (1969) y 2) el análisis conceptual, que usualmente se implementa en los modelos agregados o semi-distribuidos de los parámetros (Lee, 2006).

La modelación y predicción de respuestas hidrológicas a escala de cuenca, representan un desafío en la investigación hidrológica. Además, la incorporación adecuada de la variabilidad espacial de procesos hidrológicos que ocurren en la superficie terrestre, en los modelos, es actualmente una tarea costosa y demandante de tiempo.



La capacidad de hacer predicciones hidrológicas se ha convertido en una parte esencial del manejo sustentable de los recursos hídricos, y tal como lo plantearon Freeze y Harlan (1969) en la década de los sesenta, válido aún hoy en día, existe la necesidad de un concepto novedoso que aborde este reto.

En últimos años, se han realizado esfuerzos sustanciales para desarrollar modelos que simulen procesos hidrológicos y sus características de respuesta a escala de ladera y de cuenca en varias partes del mundo (Vannamettee, 2014). En México se han utilizado, calibrado y validado varios modelos distribuidos, semidistribuidos y agrupados que han probado sus bondades en diferentes regiones (Vargas *et al.*, 2015). Sin embargo, como lo señalan, Rojas y González (2015) la mayoría de las cuencas de México, no cuentan con suficiente información hidrométrica, parámetros de suelo y vegetación, metodologías para el análisis de la información, o modelos avalados y calibrados para la simulación del proceso lluvia-escorrentía.

Los modelos que se basan en el enfoque termodinámico REW (*Representative Elementary Watershed*) comparado con otros modelos hidrológicos, presentan ventajas de poseer un bajo número de parámetros y requerir pocos esfuerzos computacionales (Fenicia *et al.*, 2003). Dicho enfoque (Reggiani *et al.*, 1998) implica la concepción de modelos basados en procesos físicos, semi-distribuidos, determinísticos, que se fundamentan en la aplicación de ecuaciones de balance básicas aplicables con principios termodinámicos del equilibrio de la masa, momento, energía y entropía para simular los flujos insaturado, saturado, superficial saturado, superficial concentrado y en cauces por cada unidad REW, para estimar los volúmenes escurridos a nivel diario.

Se propone un concepto novedoso, donde la cuenca es disgregada en elementos funcionales (unidades REW) basados en procesos termodinámicos que caracterizan en forma escalar los procesos hidrológicos a la par de la complejidad continua de una subcuenca.



La modelación hidrológica que se plantea para la cuenca San Marcos aborda su dinámica hidrológica bajo la perspectiva del enfoque REW, la cual muestra la relación entre las unidades generadas por el modelo y los procesos hidrológicos a nivel de subcuenca. Dicho enfoque se basa en la transformación de los procesos de evapotranspiración y lluvia-escorrentía, incluyendo los límites fundamentales para los flujos de energía asociados.

La calibración y validación de este enfoque podrá mostrar la aplicabilidad y eficiencia para la predicción de los escurrimientos a nivel diario y mensual y podría convertirse en un modelo hidrológico alterno con procesos físicos, semi-distribuidos, determinísticos, de pocos parámetros pueda utilizarse en varias regiones del país, donde es difícil contar con información del medio biofísico y de parámetros que demandan la mayoría de los modelos que se utilizan en el país.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La cuenca hidrológica San Marcos se localiza en la región de la Sierra Norte del estado de Puebla y se extiende a lo largo de este estado, en Veracruz e Hidalgo. Por encontrarse inmersa en la Región Hidrológica 27, se considera que esta región contiene grandes caudales hidrológicos; los ríos que fluyen a través de la cuenca la recorren de suroeste a noreste, hasta desembocar en el río Cazonas y en el Golfo de México. En el área de influencia de la cuenca existen grandes cantidades de recursos hídricos, estos representan una importante fuente para la generación de energía hidroeléctrica desde principios del siglo XX.

En los últimos 20 años, las presas y pequeños cuerpos de agua que se ubican en la región, han reducido su capacidad de almacenamiento por la acumulación de sedimentos debido a la deforestación y al cambio de uso del suelo. Además, las presas aledañas de Los Reyes, Tenango, Nexapa y Necaxa se han contaminado con descargas de aguas residuales provenientes de las poblaciones vecinas, lo cual incrementa la vulnerabilidad de los cuerpos de agua, y aumenta el riesgo de contaminación, así como de enfermedades a las poblaciones que se encuentran en la cuenca.

Analizar la cuenca desde un punto de vista integral permite evaluar el efecto de todas las actividades que se llevan a cabo dentro de la misma. Por lo tanto, es un mecanismo ideal para interpretar el efecto a largo plazo de las acciones de manejo del suelo y los cambios de uso del suelo en los recursos hídricos. Asimismo, las cuencas hidrográficas proporcionan una base para el desarrollo de políticas y planes de restauración enfocados a determinadas áreas prioritarias, esto con el fin de mejorar la planeación del uso de los recursos naturales y resolver los problemas de manejo, de una manera estructurada y completa.

El manejo adecuado de los recursos hídricos en una cuenca, comprende un proceso de desarrollo coordinado que involucra el manejo de los recursos suelos y agua. Su propósito principal es desarrollar soluciones sostenibles que integren los aspectos técnicos, económicos y sociales de la utilización del agua. La modelación de sistemas es una herramienta que permite evaluar la respuesta hidrológica de cuencas hidrográficas en diferentes condiciones de manejo.



Por estas razones, se proponen probar un modelo hidrológico con un enfoque termodinámico que a partir de conocer la información climática (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial), modelos elevación digital (MED), uso del suelo, parámetros de conductividad hidráulica y coeficientes de rugosidad para estimar los escurrimientos por medio de procesos computacionales sencillos. Se espera que la calibración y validación del modelo con el enfoque termodinámico pueda adaptarse a una región húmeda del trópico del país.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. General**

- Determinar la aplicabilidad y eficiencia del enfoque termodinámico del modelo REW (*Representative Elementary Watershed*) para calcular los escurrimientos diarios y mensuales de la cuenca San Marcos.

#### **3.2. Particulares**

- Simular los escurrimientos de la cuenca San Marcos con el modelo REW y compararlos con los registrados en la estación hidrométrica Poza Rica (27002).
- Calibrar los parámetros más sensibles del modelo hasta obtener valores adecuados en los índices de eficiencia.
- Validar el modelo con los escurrimientos registrados en la estación hidrométrica con la finalidad de recomendar su aplicación en cuencas de nuestro país.



## **4. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS**

### **4.1. Hipótesis**

- El modelo REW es capaz de simular los escurrimientos de la cuenca San Marcos con un nivel de confiabilidad aceptable.

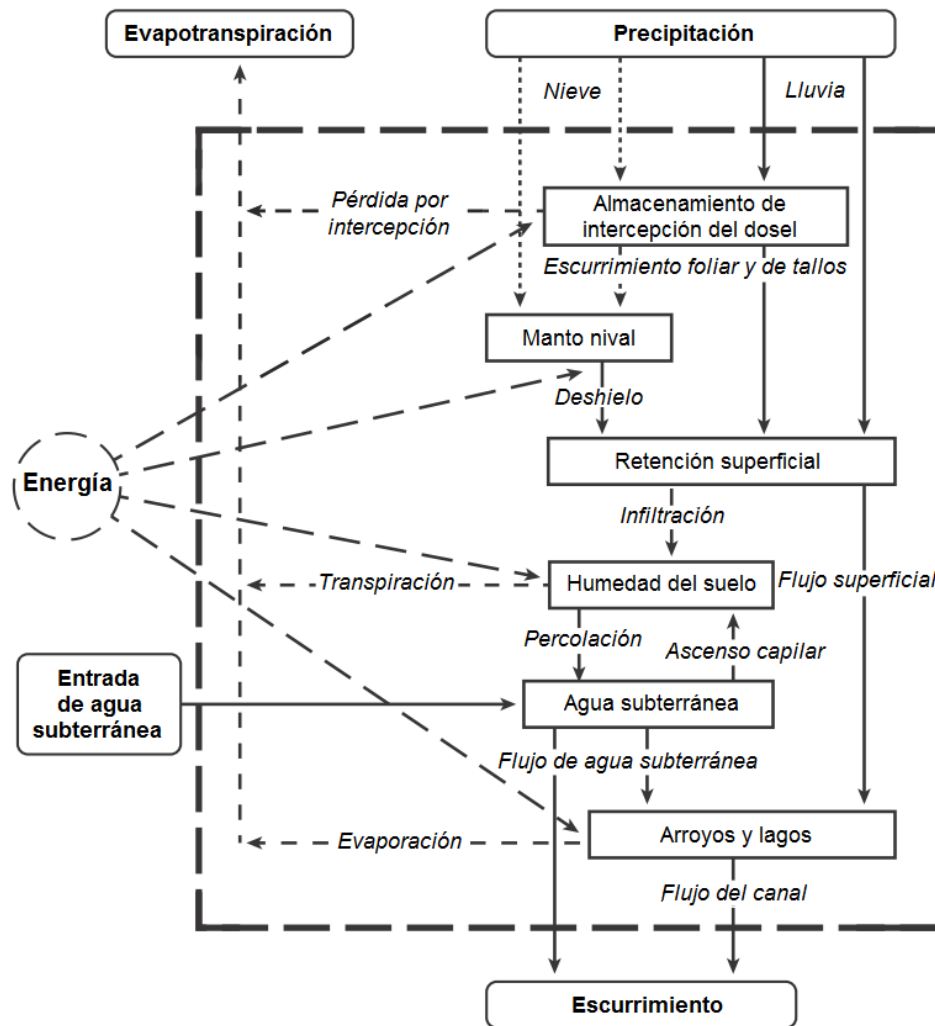
### **4.2. Supuestos**

- Los insumos cartográficos digitales y la información meteorológica e hidrométrica utilizados en el proceso de simulación de escurrimientos son confiables y estadísticamente consistentes.

## 5. REVISIÓN DE LITERATURA

### 5.1. El ciclo hidrológico y la energía

Existen diversas representaciones del ciclo hidrológico, no obstante, la que presenta Dingman (2015), incorpora los componentes y procesos del ciclo hidrológico como almacenamientos, interacciones y flujos del agua en su fase terrestre, todos ellos incluyendo la energía como factor fundamental (Figura 1).



**Figura 1.** Almacenamientos (rectángulos) y flujos (flechas) del agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico. La línea punteada representa el parteaguas de una cuenca u otra región.

MODIFICADO DE DINGMAN (2015).

De acuerdo con Campos (1998), el ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra; involucra un proceso de transporte circulatorio y permanente, este movimiento continuo del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para que el agua se evapore; la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

Pereyra *et al.* (2010) también mencionan que el movimiento del agua en el ciclo hidrológico se mantiene por la energía radiante del sol y por la fuerza de la gravedad, mientras que Dingman (2015) adiciona que la energía que determina el clima de la tierra e impulsa el ciclo hidrológico llega en forma de radiación electromagnética del sol.

Musy y Higy, (2010) señalan que, dada la complejidad de sus fenómenos, no hay un solo ciclo del agua sino varios, que se encuentran estrechamente relacionados con otros ciclos; por ello, la escala es un factor importante a tomar en cuenta. Una descripción del ciclo hidrológico a escala global implica considerar otros ciclos internos, las propiedades vectoriales del agua incorporan ciclos asociados, como de los ciclos de energía y materia.

Hao *et al.* (2010) establecen que todos los procesos naturales en el ciclo hidrológico pueden considerarse como una contribución inherente a los cambios en magnitudes termodinámicas, como la entropía; considerar de manera global la energía y la entropía, proporciona información sobre el mantenimiento y la estabilidad del clima de la Tierra. Tal consideración requiere examinar no solo los procesos internos en el sistema termodinámico Tierra-atmósfera, sino también las interacciones con el ambiente del sistema, particularmente con respecto a la intensidad de la radiación solar y a la relación geométrica entre la Tierra y el sol (Curry y Webster, 1999).

Las transferencias de calor entre la atmósfera, la superficie del suelo y las superficies de los cuerpos de agua son los principales agentes de la evaporación; estos intercambios de energía siempre se contrarrestan con la transferencia de agua, que se evapora en un lugar para condensar en otro, cayendo en forma de precipitación; dichas transferencias de calor mantienen el ciclo del agua (Musy y Higy, 2010).



Curry y Webster, (1999) enuncian que para entender la termodinámica del agua es fundamental el equilibrio entre las diferentes fases del agua y las transiciones entre los estados gaseoso, líquido y sólido. Los intercambios de agua y energía entre la superficie y la atmósfera son procesos centrales del ciclo hidrológico; el agua se intercambia a través de la precipitación y la evaporación, mientras que los intercambios de energía se producen a través de: radiación electromagnética, calor sensible (flujo de calor impulsado por gradientes de temperatura) y calor latente (flujos de calor que acompañan los cambios de fase vapor-líquido) (Dingman, 2015).

Las fases principales del ciclo hidrológico: evaporación, precipitación y flujo de aguas superficiales y subterráneas incluyen los fenómenos de transporte, almacenamiento temporal y, a veces, el cambio entre dichas fases. El transporte de agua en el sistema Tierra-atmósfera y los cambios de fase, modulan sustancialmente la energía global y los equilibrios de entropía (Curry y Webster, 1999).

Esto implica que el ciclo del agua puede ser modelado por medio de ecuaciones diferenciales que representen la conservación de la masa, la energía o la cantidad de movimiento (Musy y Higy, 2010). Estas ecuaciones, describen la física del ciclo hidrológico y son también pertinentes para describir los sistemas utilizados con el fin de medir sus propiedades en desplazamiento (OMM, 2011a).

## 5.2. Sistemas hidrológicos

En las últimas décadas, ya se comenzaba a manejar el ciclo hidrológico como un sistema con variables definidas, permitiendo conocer las cantidades de agua y los flujos involucrados en el mismo; otorgándole así, un sentido cuantitativo y racional a la Hidrología. Según Freeze y Harlan (1969), el ciclo hidrológico actúa como un sistema dinámico que opera dentro de un conjunto de restricciones o leyes físicas que controlan el movimiento, almacenamiento y disponibilidad del agua dentro del sistema; dicho sistema deriva su energía del desequilibrio espacial entre la radiación entrante y saliente a la atmósfera. A la vez, cuando se considera el almacenamiento y movimiento de agua *in situ* o dentro del sistema, el ciclo hidrológico se comporta como un sistema cerrado, por lo tanto, se ajusta al principio de conservación de la masa.

Dooge (1968) agrega que el objetivo de un sistema hidrológico es generar salidas a partir de entradas, o en su defecto, interrelacionar dichos elementos; las salidas de un sistema dependen directamente de las entradas, las leyes físicas involucradas y la naturaleza del sistema en sí.

Campos (1998) señala que los sistemas de este tipo presentan un conjunto de elementos o procesos físicos unidos a través de alguna forma de interdependencia, que actúa sobre un grupo de variables de entrada para convertirlas después, en las de salida. Conjuntamente, en estos sistemas, cada uno de los elementos o procesos integrantes son el resultado de complicadas interrelaciones de diversos factores con gran variabilidad espacial y temporal.

Engelen y Kloosterman (1996) consideran un sistema hidrológico como una unidad geográficamente distinta, coherente y funcional de subsistemas de aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas, costas e infraestructura técnica del agua. Dichos subsistemas también incluyen las comunidades bióticas a la par de sus características y procesos asociados: físicos, químicos, naturales y artificiales; los límites del sistema se basan principalmente en la coherencia geológica, morfológica, ecológica y funcional.

En esencia, los sistemas hidrológicos no pueden describirse ni predecirse por completo mediante métodos de mecánica determinística, ni por medio de física estadística; estos, como sistemas de "complejidad organizada", exhiben la mezcla de ambas dimensiones, siendo bastante predecibles bajo determinadas condiciones y a ciertas escalas, pero impredecibles en otras (Ehret *et al.*, 2014).

La OMM (2011b) estableció que todos los procesos y sistemas hidrológicos han sido descritos mediante ecuaciones matemáticas, algunas de las cuales se han obtenido de leyes físicas rigurosas de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Chow *et al.*, (1994) señalan un punto clave en cuanto a manejar el ciclo hidrológico como un sistema más restringido, introduciendo el concepto de volumen de control (referencia en tres dimensiones a través de la cual los fluidos circulan); este volumen proporciona una estructura para la aplicación de las leyes de conservación de masa, momento y energía para obtener ecuaciones prácticas de movimiento.

De igual forma, hacen referencia a los sistemas hidrológicos como aproximaciones al sistema real, por lo tanto, sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan dichas entradas y salidas. Estos sistemas presentan tal complejidad que no se han desarrollado leyes exactas que puedan explicar completamente los fenómenos hidrológicos naturales, por ello se recurre a los modelos matemáticos de simulación para reproducir y predecir su funcionamiento (Campos, 1998).

### **5.3. El proceso de modelado y simulación**

Los modelos hidrológicos se requieren en la planeación del uso del suelo si se pretenden evaluar las consecuencias de las estrategias de desarrollo del recurso hídrico. Estos modelos se necesitan para tomar en cuenta las diferencias en las características del sitio y para simular las consecuencias de esquemas de desarrollo alternativos (Overton y Meadows, 2013).

El espacio donde se desarrolla un modelo puede incluir diferentes estructuras del mismo y dentro de cada estructura, varios conjuntos de parámetros, que se espera que generen predicciones razonables de la respuesta funcional de la cuenca o puntos dentro de la cuenca; en general, los modelos deben hacer predicciones de las variables requeridas en una aplicación, de las cuales existan observaciones para la posterior evaluación del modelo (Beven, 2002).

Los propósitos de un modelo de respuesta hidrológica de acuerdo con Freeze y Harlan (1969) deben ser:

- (1) Sintetizar eventos hidrológicos pasados.
- (2) Predecir eventos hidrológicos futuros para evaluar combinaciones de eventos hidrológicos ocurriendo de manera atípica en la naturaleza.
- (3) Evaluar los efectos de los cambios artificiales impuestos por el hombre sobre el régimen hidrológico.
- (4) Proveer medios de investigación para mejorar nuestra comprensión de la hidrología en general, y del proceso de escurrimiento, en particular.

Desde ese tiempo se plantearon conceptos importantes para la modelación que se conoce actualmente, y otros autores como Dingman (2015) se dieron a la tarea de representar esquemáticamente el proceso de modelado (Figura 2). Los principales elementos de dichos procesos son: (1) propósitos del modelo (2) conceptualización del problema, (3) selección o desarrollo del modelo apropiado ("identificación"), (4) estimación de parámetros ("calibración"), y (5) prueba de aceptación ("validación").

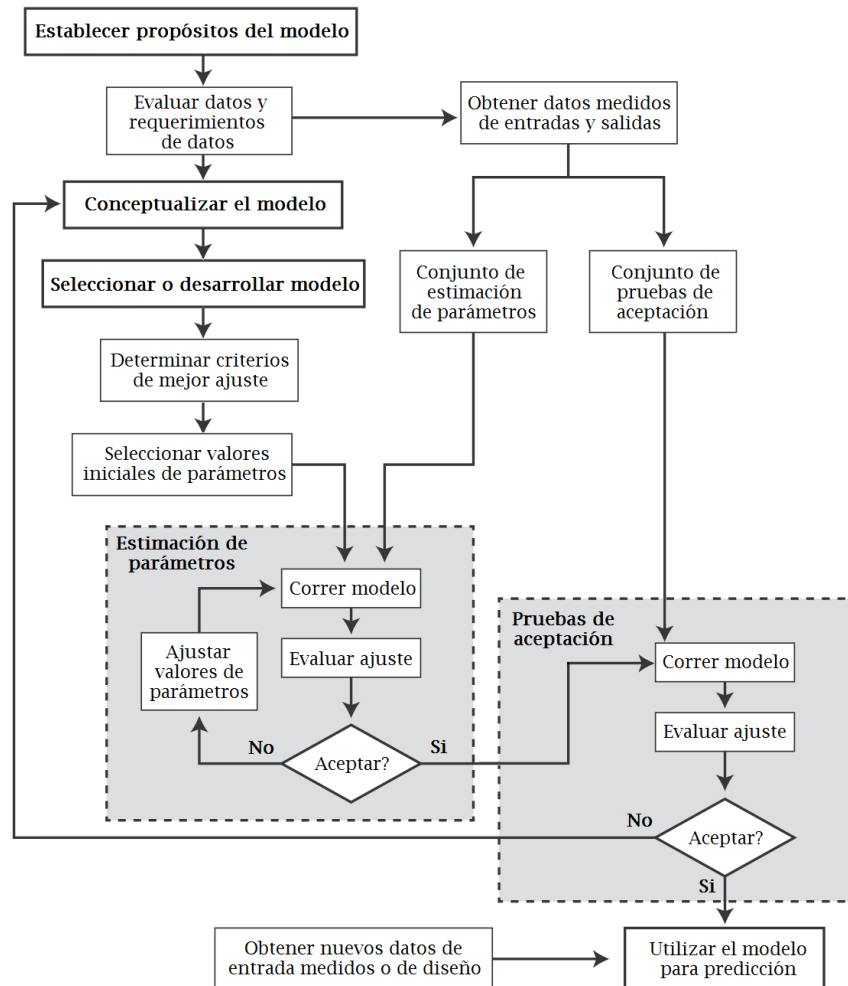


Figura 2. Proceso de modelado. MODIFICADO DE DINGMAN (2015).

Cabe señalar que algunos modelos no reproducirán las observaciones y pueden rechazarse como "no conductuales", mientras que otros serán capaces de reproducir las observaciones hasta cierto nivel de aceptabilidad, considerándose "conductuales". Sin embargo, puede no haber un límite claro entre lo que se considera aceptable y lo que no lo es, y muchos modelos pueden caer en un terreno intermedio que resulte posiblemente aceptable (Beven, 2002).

En su investigación, Freeze y Harlan (1969) presentan dos enfoques básicos, que abordan la simulación hidrológica: hidrología física y la investigación de sistemas hidrológicos.

La hidrología física involucra la investigación científica con respecto a los mecanismos y procesos que componen el ciclo hidrológico; si cada proceso puede ser descrito por medio de una ley física bien definida con una representación matemática exacta, entonces es posible la modelación de una cuenca entera.

En contraste, el enfoque de investigación de sistemas hidrológicos incorpora la medición de variables observables del ciclo hidrológico y el desarrollo de relaciones explícitas entre estos parámetros. La Figura 3 muestra en un diagrama esquemático los componentes de los métodos de simulación hidrológica.

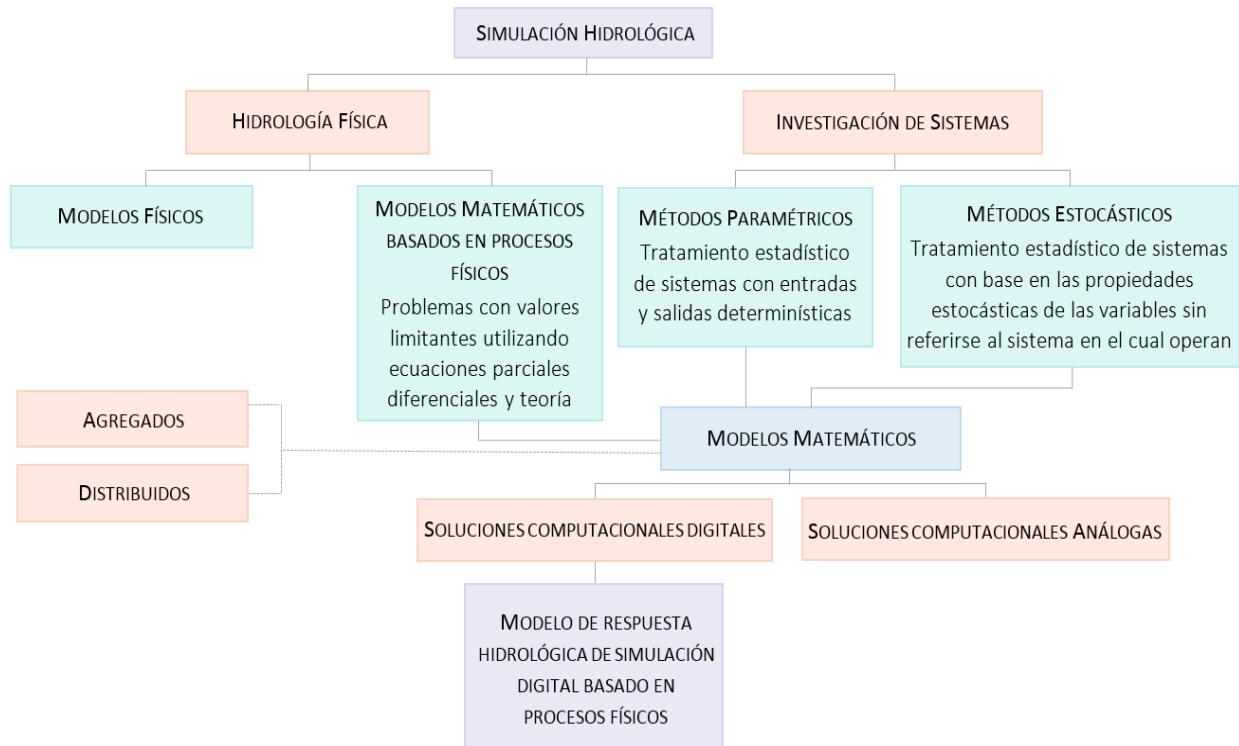


Figura 3. Métodos de simulación hidrológica. (Freeze y Harlan, 1969).

Un modelador debe elegir lo compleja que debe ser la representación matemática de un sistema, esta decisión radica principalmente en el objetivo de determinado proyecto, las habilidades del modelador y restricciones de recursos que se presenten (Overton y Meadows, 2013).

#### **5.4. Clasificación de los modelos hidrológicos**

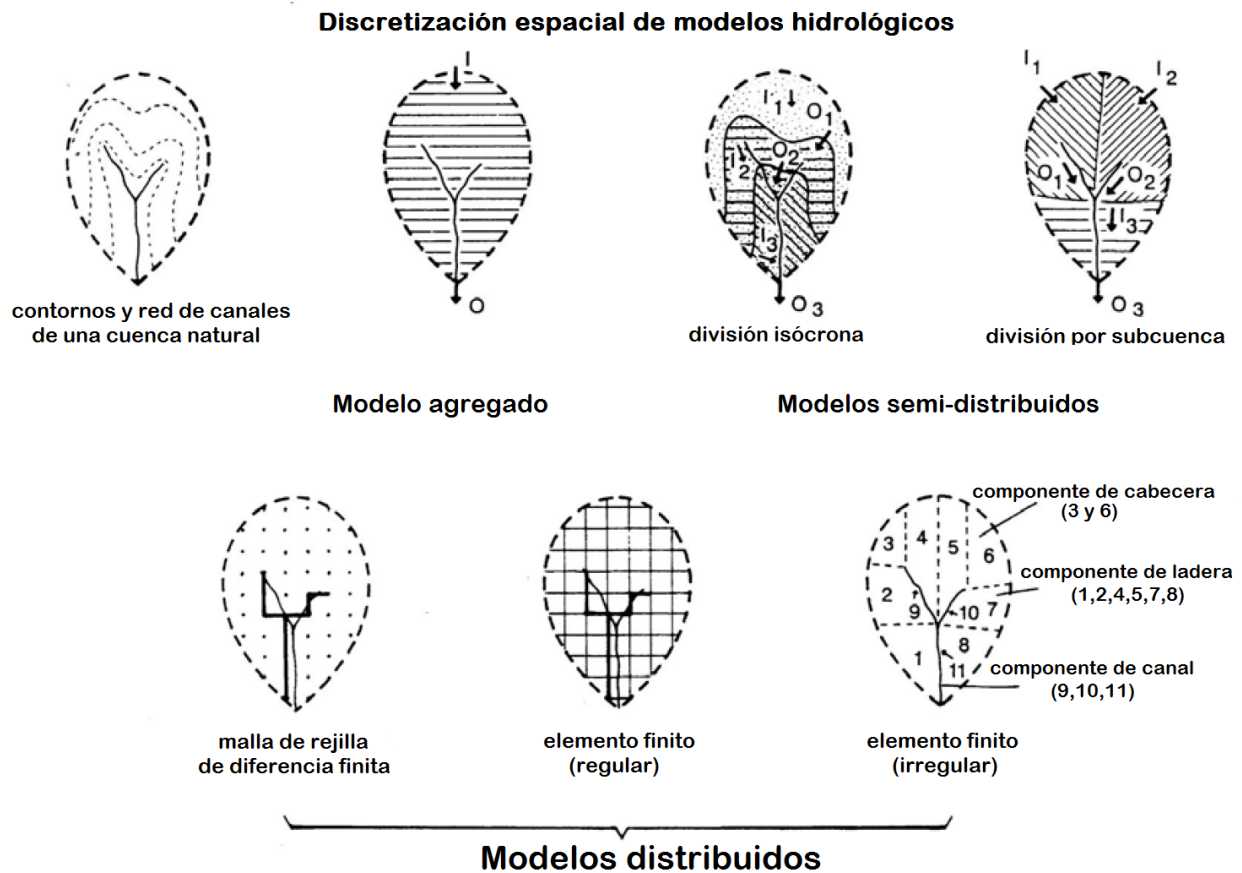
Durante decenios previos, se han creado y perfeccionado una cantidad importante de modelos hidrológicos; estos son de diferentes tipos y fueron desarrollados para diferentes propósitos, sin embargo, dichos modelos cuentan con similitudes estructurales, mientras que otros son completamente distintos (Singh, 1995).

Los modelos hidrológicos generalmente se clasifican de acuerdo al método que utilizan para describir los procesos hidrológicos, las escalas espaciales y temporales para los que fueron diseñados, y cualquier otra condición específica para la cual hayan sido diseñados. Es recomendable conocer estos componentes para poder hacer la selección que mejor se adapte a una cuenca y objetivo determinado (Burns *et al.*, 2007).

Domnița (2012) señala que los recursos hídricos se pueden modelar para diferentes propósitos (inundaciones, calidad del agua, suministro de agua, diseño de infraestructura, estudios de caso sobre el paisaje en una región determinada) y cada uno de estos propósitos necesita analizar otro aspecto del comportamiento del agua, junto con las leyes que lo rigen, para dar pie a la modelación.

Los modelos de cuencas hidrográficas usan escalas temporales diferentes para los cálculos computacionales, además de la escala espacial; los modelos basados en eventos generalmente requieren periodos cortos de tiempo, a veces, de segundos. Estos modelos son adecuados para analizar la influencia de las tormentas de diseño. Los periodos de tiempo más largos (de días), suelen ser suficientes para los modelos continuos, apropiados para la evaluación a largo plazo del cambio hidrológico, de uso del suelo y prácticas de manejo (Arabi *et al.*, 2006).

Como se puede observar en la Figura 4, la variabilidad espacial en una cuenca hidrográfica puede representarse utilizando un esquema de discretización regular con una superficie cuadriculada con celdas de igual tamaño; alternatively, los modelos distribuidos pueden usar unidades espaciales de diferente tamaño y geometría para representar la heterogeneidad de la cuenca (Vannamettee, 2014).

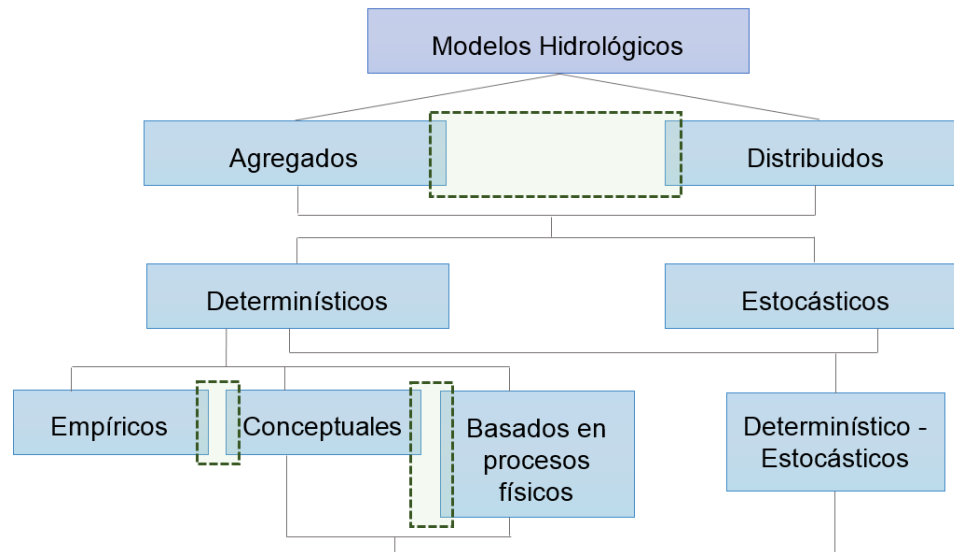


**Figura 4.** Representación gráfica de modelos hidrológicos. I es entrada y O es salida.

MODIFICADO DE JONES (1997).

Overton y Meadows (2013), dedujeron diferencias entre modelos determinísticos, y paramétricos; los primeros tienen una estructura teórica basada en leyes físicas conjuntamente a medidas de condiciones iniciales, de frontera y de entrada; los segundos no son tan estrictos en términos de considerar entidades físicas medibles y sus parámetros se determinan al ajustar el modelo a datos hidrológicos mediante una técnica de optimización.

Zhang (2007) indica que al considerar la discretización espacial, los modelos se pueden diferenciar en tipos agregados y distribuidos; ahora bien, si se considera la distribución de los valores de los parámetros y la relación correspondiente de los parámetros de salida, se pueden diferenciar entre modelos determinísticos y modelos estocásticos (Figura 5).



**Figura 5.** Clasificación de modelos hidrológicos. MODIFICADO DE ZHANG (2007).

En los modelos hidrológicos **agregados**, se considera una cuenca hidrográfica como una unidad individual que se comporta de acuerdo con una función de respuesta empírica o cuasi-empírica, dependiente o poco dependiente de la descripción analítica de los procesos físicos y heterogeneidad espacial. Parten de la idea de que, para esta unidad única, hay una sola entrada de lluvia (promedio), donde el gasto de salida se genera a partir de una dinámica global del sistema (Martínez, 2013).

Además, dejan de lado la heterogeneidad de las entradas, los parámetros, las variables de estado sobre la cuenca y la variación temporal del escurrimiento en donde influyen factores como: erosión, urbanización, reforestación, construcción de obras de control, cambios climáticos, etc. (Vannamettee, 2014).

Por otro lado, los modelos hidrológicos **distribuidos** permiten la representación de la variabilidad espacial dentro de la cuenca; se basan en la idea de tratar al sistema como un conjunto discreto de pequeñas unidades homogéneas que aborda la heterogeneidad espacial con referencia completa hacia la representación analítica de los procesos físicos que actúan en cada unidad (Aral y Gunduz, 2006).

En estos modelos, la superficie de la cuenca se subdivide en unidades elementales, que se consideran internamente uniformes. Al mismo tiempo, las variables de estado y los flujos se calculan explícitamente para cada unidad generada y se encausan a lo largo de la ruta de flujo en sentido descendente hasta la salida de la cuenca (Vannamettee, 2014).



Terminada la subdivisión en unidades, se asumen propiedades homogéneas para cada una; a medida que las entradas del modelo se promedian por unidad, las simulaciones del modelo se ven afectadas por el tamaño y el número de estas.

Los modelos de parámetros agregados proveen un entendimiento general del sistema, sin proporcionar una cobertura comprensiva de los detalles, mientras que los modelos distribuidos, basados en procesos físicos, brindan los detalles más necesarios pertenecientes al sistema de la cuenca hidrográfica (Aral y Gunduz, 2006).

Arabi *et al.*, 2006, señalan que la aplicación de un solo modelo de cuenca única no satisface todas las condiciones de un estudio. Según el entorno en el que se haya desarrollado un modelo, puede incluir una combinación de componentes de parámetros agrupados y distribuidos. Por lo tanto, algunos componentes del modelo pueden ser empíricos, mientras que otros se basan en procesos físicos.

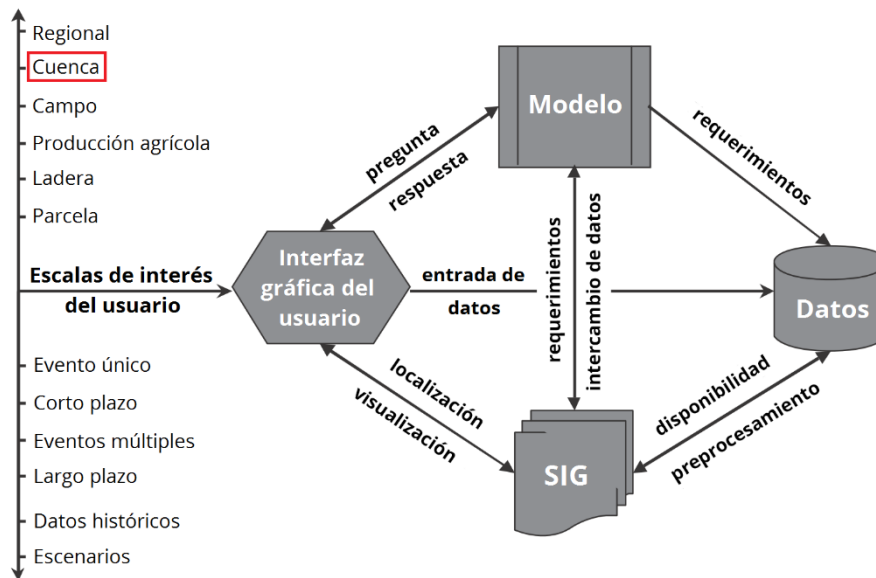
Overton y Meadows (2013), coinciden con este supuesto integral mencionando que los modelos paramétricos y determinísticos pueden y deben ser complementarios; en caso de haber datos disponibles, ambos tipos de modelos pueden ser utilizados. Por ejemplo, el modelo paramétrico, podría ser aplicado como la base científica para la predicción de hidrogramas sobre una base regional, mientras que el modelo determinístico investigaría el efecto sobre el escurrimiento en diferentes escenarios de uso del suelo y simularía los mecanismos de transporte.

De acuerdo con Arabi *et al.* (2006), el mayor reto es identificar una escala óptima de resolución geomorfológica de modo que un mayor refinamiento en la escala espacial no contribuya a una mejora significativa en los parámetros de diseño predictivo en la salida de la cuenca. Dicha escala espacial puede no ser siempre identificable, dependiendo de los procesos representados en el modelo.

### **5.5. Modelos de simulación hidrológica a nivel de cuenca**

Las herramientas de modelado y manejo de datos pueden contribuir a la información necesaria para tomar decisiones informadas; aunque estas herramientas son cuantitativas, se basan en juicios cualitativos sobre qué información es o no importante incluir o considerar (Loucks y Beek, 2005).

Renschler (2005), hace hincapié en la importancia de diseñar una estructura funcional para una aplicación e implementación efectiva de modelos; estos deben tomar en cuenta los procesos ambientales fundamentales a una escala de interés, de modo que coincida con la disponibilidad real de datos, además de evaluar el impacto de diferentes fuentes de información e incertidumbre en los resultados del modelo, así como la toma de decisiones (Figura 6).



**Figura 6.** Herramientas de evaluación ambiental y aplicación de modelos a escala múltiple. MODIFICADO DE RENSCHLER (2005)

De acuerdo con la EPA (2011), una cuenca hidrológica debe analizarse como un sistema o ente dinámico que incluye la variabilidad en la cantidad y calidad de agua superficial y subterránea, los recursos biológicos y su hábitat, y otros procesos clave (geomorfológicos, topográficos); de manera integral, estos elementos coadyuvan a obtener los recursos hídricos saludables.

Ponce (1989), se refiere a los modelos hidrológicos a nivel de cuenca como un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo del agua, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. La modelación comprende la integración de los procesos hidrológicos y se considera como una alternativa para interrelacionar factores complejos como suelo y clima y presentar resultados de la distribución del agua en la cuenca; por ejemplo, la modelación de una cuenca se puede hacer con finalidades de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, pronóstico de flujo, etc. (Benavides *et al.*, 2005).

Singh (1995), hace alusión a los modelos de cuencas hidrológicas y su composición, esta, en cinco elementos básicos: los procesos hidrológicos y características de la cuenca; datos de entrada; sistema de ecuaciones; condiciones iniciales y limitantes; y datos de salida.

Según Oropeza (1990), el objetivo principal de un modelo hidrológico es el de determinar con eficiencia y precisión los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca, y estimar la magnitud y ocurrencia de los fenómenos de frecuencia rara (abundancia y carencia).

La utilidad de los modelos hidrológicos radica en conocer, simular y predecir daños que podrían ser causados por inundaciones y sequías, así como resolver problemas de balance de agua y de administración de los recursos hidráulicos y uso del suelo en una cuenca (Benavides, 1998).

## **5.6. Modelos de simulación en México**

De acuerdo con Rojas y González (2015), la mayoría de las cuencas en México, no cuentan con suficiente información hidrométrica, metodologías para el análisis de la información, o modelos avalados y calibrados para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento. A pesar de ello, en nuestro país predomina el uso de modelos hidrológicos como el *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), el *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) y en menor medida el *Système Hydrologique Européen* (MIKE SHE).

Baldemar (2005) sugiere que uno de los programas de libre acceso más populares utilizado para simular el proceso hidrológico lluvia-escurrimiento a nivel global, es el HEC-HMS. Está compuesto por tres módulos principales: modelo de cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control; su estructura permite utilizar diferentes modelos hidrológicos semi-distribuidos en el proceso de simulación, además de modelar varias cuencas a la vez.

SWAT, es un modelo conformado a largo plazo, que requiere como insumos información climática, propiedades y uso del suelo, topografía, y prácticas de manejo de las cuencas a evaluar. Tiene una estructura integral que modela los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cultivos, ciclo de nutrientes, etc. (Douglas *et al.*, 2010).

Se realizan los cálculos de: volumen de escurrimiento superficial, flujo de agua subterránea y un generador de tiempo que crea valores diarios (precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa) a partir de los valores medios mensuales (Gassman *et al.*, 2007).

Existen diversos estudios donde se ha empleado el modelo SWAT en cuencas de la República Mexicana; sus resultados presentan diferencias por áreas de estudio con climas contrastantes, además de la cantidad de datos utilizados para las evaluaciones.

Salas *et al.* (2013) aplicaron el modelo SWAT para calcular los escurrimientos de la cuenca del río Mixteco en Oaxaca, obteniendo en la calibración, valores del índice de Nash-Sutcliffe (NSE) y Coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.93, 0.94 a nivel anual y 0.83, 0.83 a nivel mensual, respectivamente. En cuanto a la validación, los valores fluctuaron con NSE=0.90,  $r^2$ =0.98 anualmente y NSE=0.79,  $r^2$ =0.82 mensualmente.

Velázquez *et al.* (2015, 2017) realizaron sus evaluaciones de escurrimientos mensualmente para la cuenca del río Tampaón en San Luis Potosí y consiguieron valores de NSE=0.91 en quince años de calibración y NSE=0.85 para un mismo número de años de validación.

Molina *et al.* (2016) revisaron la aplicabilidad del modelo SWAT en la cuenca del río Guadalupe, Baja California; reportaron n valores en la calibración de NSE=0.66,  $r^2$ =0.67 a nivel diario y NSE=0.86,  $r^2$ =0.91 a nivel mensual y en la validación de NSE=0.52,  $r^2$ =0.55 y NSE=0.76 y  $r^2$ =0.82 en esos mismos niveles.

En el estudio de Sánchez *et al.* (2017) se calibraron y validaron los escurrimientos anuales y mensuales de la cuenca del río Sordo, en Oaxaca utilizando SWAT. Se obtuvieron para el periodo de calibración, valores de NSE=0.65,  $r^2$ =0.61 y NSE=0.83,  $r^2$ =0.84; mientras que para el de validación, de NSE=0.75,  $r^2$ =0.61 y NSE=0.81,  $r^2$ =0.70 de manera correspondiente, anual y mensualmente.

MIKE SHE (*Système Hydrologique Européen*), por ser un modelo basado en procesos físicos, tiene la ventaja de poder describir explícitamente la respuesta de cuenca a escalas pequeñas, y comparado con modelos basados en procesos empíricos a una escala equivalente, produce resultados con mayores grados de precisión con respecto a valores observados, dada su estructura (Frana, 2012).

Es un modelo hidrológico complejo, de uso reciente en nuestro país, sin embargo, por tratarse de un programa de acceso privado cuyo costo de licencia es alto, existen pocas aplicaciones. Como ejemplos de su utilización en México está el de Gondwe *et al.* (2011) que evalúan su desempeño en la Cuenca de la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an en Quintana Roo, así como el de Vargas y Gourbesville (2016) que lo evalúan en la Cuenca de México.

### **5.7. Enfoque REW (*Representative Elementary Watershed*)**

El enfoque REW fue introducido en una serie de estudios (Reggiani *et al.*, 1998, 1999, 2001) y más tarde fue descrito a detalle por Reggiani y Rientjes (2005); de manera general, implica la concepción de modelos basados en procesos físicos, semi-distribuidos, determinísticos, fundamentados en la aplicación de ecuaciones de balance básicas que se utilizan directamente a escala de microcuenca. Estas ecuaciones se consideran fundamentales para los procesos en los cuales se basa la respuesta hidrológica de un elemento de control de volumen del paisaje. La red de drenaje se genera directamente del modelo de elevación digital y la cuenca se discretiza en elementos representativos (REWs) dependiendo del orden de Strahler que se elija (Fenicia *et al.*, 2003).

Según el planteamiento de Reggiani *et al.* (1998), una cuenca constituye un sistema termodinámico abierto, donde la masa, el momento, la energía y la entropía se encuentran en intercambio permanente con la atmósfera y regiones circundantes. Las fuerzas atmosféricas (precipitación, radiación solar), así como la gravedad (escurrimiento), juegan un papel fundamental en estos procesos; a su vez, dichos intercambios se rigen por la entrada, pérdida y transferencia de masa; desde la atmósfera (durante tormentas), hacia la atmósfera y hacia regiones adyacentes, respectivamente.

Los balances de agua y energía terrestres, el transporte de sedimentos y contaminantes, la erosión, problemas de salinidad, entre otros, a escala de cuenca, resultan relevantes en la implementación de modelos.

El enfoque REW se considera pionero en proponer un tratamiento simple pero termodinámicamente consistente del equilibrio de la masa, energía y momento de los volúmenes de control hidrológicamente homogéneos.

Reggiani *et al.* (1998, 1999) derivaron el conjunto de ecuaciones de equilibrio para los volúmenes de subcontrol/dominios de proceso de REW's utilizando promedios termodinámicos consistentes.

Las ecuaciones en las cuales se basa el enfoque REW realizan un balance global en términos de una propiedad termodinámica genérica  $\psi$  a microescala. Para un continuo que ocupa un volumen arbitrario  $V^*$ , delimitado por una superficie limitante  $A^*$ , la ecuación de balance para  $\psi$  se establece de acuerdo con la Ecuación 1 (Reggiani *et al.*, 1998).

$$\frac{d}{dt} \int_{V^*} \rho \psi dV + \int_{A^*} n^* [\rho(v - w^*)\psi - i] dA - \int_{V^*} \rho f dV = \int_{V^*} G dv \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $\mathbf{n}^*$  es la unidad normal hacia  $A^*$  con dirección hacia afuera,  $\mathbf{v}$  es la velocidad del continuo,  $\mathbf{w}^*$  es la velocidad de  $A^*$ ,  $\mathbf{i}$  es un flujo difuso y  $\rho$  es la densidad de la masa del continuo. Las cantidades  $\psi$ ,  $\mathbf{i}$ ,  $f$  y  $G$  se deben elegir según el tipo de propiedad termodinámica considerada. Para las ecuaciones de masa, momento, energía y entropía, las propiedades se indican en el Cuadro 1.

La propiedad  $E$  es la energía interna microscópica por unidad de masa,  $\mathbf{t}$  es el tensor microscópico,  $\mathbf{g}$  es el vector gravitatorio,  $\mathbf{q}$  es el vector microscópico de flujo de calor,  $h$  es el suministro de energía interna del mundo exterior,  $\eta$  es la entropía microscópica por unidad de masa,  $\mathbf{j}$  es el flujo no convectivo de entropía,  $b$  es el suministro de entropía del mundo externo y  $L$  es la producción de entropía dentro del continuo.

**Cuadro 1.** Resumen de propiedades para ecuaciones de balance.

Cantidad	$\psi$	$\mathbf{i}$	$f$	$G$
Masa	1	0	0	0
Momento	$\mathbf{v}$	$\mathbf{t}$	$\mathbf{g}$	0
Energía	$E + \frac{1}{2}v^2$	$\mathbf{t} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{q}$	$h + \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}$	0
Entropía	$\eta$	$\mathbf{j}$	$b$	$L$

Una interpretación más amplia de la primera ley de la termodinámica señala que el total de todas las conversiones de energía entre diferentes formas de energía dentro de un sistema, necesita equilibrar los intercambios de energía con su entorno; por otro lado, la segunda ley implica que los procesos naturales se llevan a cabo de tal forma que merman sus gradientes de conducción (Kleidon *et al.*, 2013).

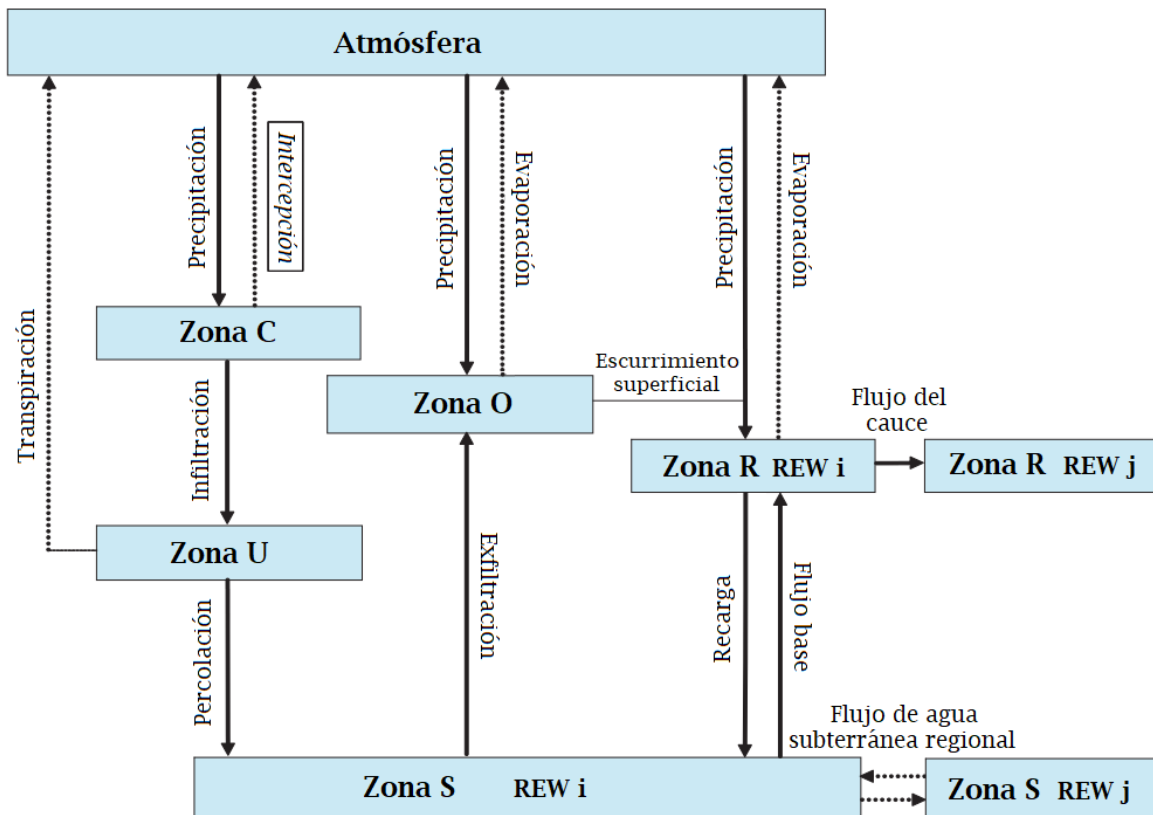
Las propiedades termodinámicas pueden intercambiarse a través de los límites inter-subregionales (por ejemplo, áreas de filtración, lecho del cauce, bordes del cauce) o límites entre REWs (segmentos del manto) con REWs contiguas. Además, dentro de las zonas saturadas e insaturadas, las fases intercambian propiedades a través de sus fluctuaciones (agua-suelo, agua-gas y gas-sólido); se supone que todas estas superficies carecen de propiedades termodinámicas inherentes (Reggiani *et al.*, 1998).

Los parámetros y las variables de estado incorporadas en el modelo REW, deben considerarse como representaciones efectivas de parámetros y variables de estado a escala puntual (Zehe *et al.*, 2014). Lo anterior no es aplicable para el enfoque de modelado basado en grids o cuadrículas, esto plantea una limitación en el modelado basado en procesos físicos para modelos con gran resolución (Vannamettee, 2014).

El enfoque proporciona ecuaciones basadas en física que se incorporan a una cuenca hidrográfica en su conjunto. Una REW se divide en zonas o dominios, cada uno representa un compartimiento hidrológico particular con procesos asociados (Figura 7). A su vez, presenta, potencialmente, un marco para desarrollar, de manera integral, modelos de cuencas hidrográficas basados en procesos físicos directamente aplicables a escala de cuenca (Lee *et al.*, 2007).

Las ecuaciones que se utilizan cuentan con parámetros como conductividad hidráulica, porosidad, humedad del suelo, rugosidad que se deben especificar para el cálculo de los elementos en sus respectivos dominios. Una vez que se define una escala (en cuanto al grid) para la solución de las ecuaciones, todos los procesos a pequeña escala son parametrizados de manera aproximada (Beven, 2012).





**Figura 7.** Ilustración esquemática de los dominios del modelo y sus procesos asociados.

MODIFICADO DE ZHANG *ET AL.* (2005)

Los supuestos considerados en sus formulaciones iniciales son que para las zonas de flujo saturado e insaturado, las pérdidas de energía por fricción son una función lineal de velocidad, mientras que para el flujo superficial y del cauce, las pérdidas de energía por fricción son una función de velocidad al cuadrado. Estos están en concordancia con las ecuaciones de proceso a pequeña escala de la Ley de Darcy para flujo poroso medio y relaciones de flujo uniforme (Manning, Chezy, Darcy-Weisbach) para el flujo superficial y del cauce (Beven, 2002).

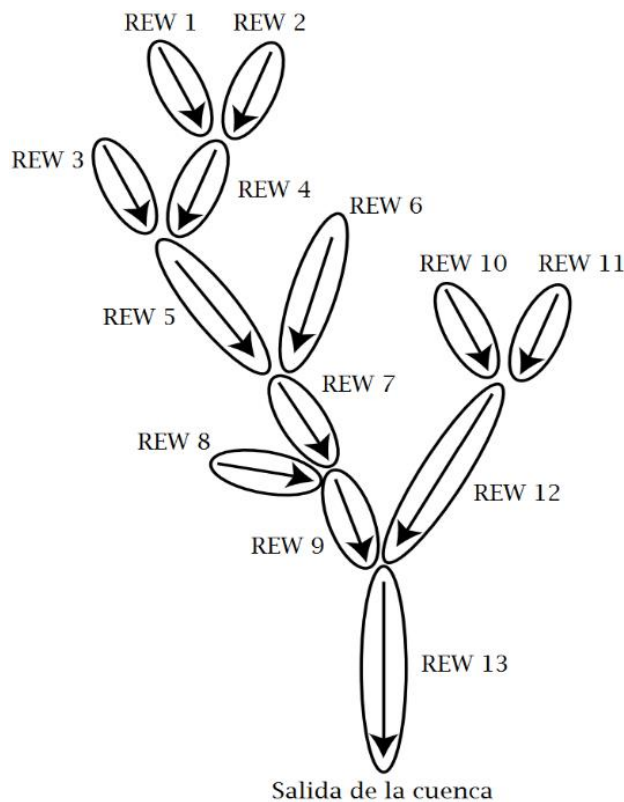
Los modelos requieren una cuantificación explícita de los términos de flujo de masa en las ecuaciones de balance para cada zona o dominio específico de REW. Los flujos transfronterizos entre dichas zonas pueden calcularse mediante relaciones funcionales entre los atributos del estado y del sistema (Vannamettee *et al.*, 2012).



Reggiani y Rientjes (2005) mencionan que las REW's pueden ser pendientes o tener la forma de la microcuenca, y estar ligadas por volúmenes de control del cauce, o bien, reflejando la estructura topográfica de la microcuenca.

Como lo señalan Kleidon *et al.* (2013), el escurrimiento de la Tierra no se difunde aleatoriamente a través del suelo hasta el océano, sino que se acumula en canales organizados en estructuras similares a árboles a lo largo de gradientes topográficos.

En la Figura 8 se esquematiza la estructura que poseen las unidades REW, estas se definen mediante análisis topográficos y constituyen un conjunto de volúmenes interconectados, organizados alrededor de la estructura de árbol binaria de la red de flujo de los cauces que conforman la cuenca (Reggiani y Rientjes, 2005).



**Figura 8.** Organización jerárquica de unidades REW. MODIFICADO DE REGGIANI *ET AL.* (1998).

La subdivisión de las unidades REW puede ser definida por características topográficas o formaciones geológicas, por patrones de cobertura o uso del suelo, o por factores antrópicos tales como la urbanización, que influyen en el comportamiento del flujo (Reggiani y Hassanizadeh, 2016).

Zhang *et al.* (2005) señalan que el enfoque sugiere la discretización de una cuenca en varios elementos o unidades REW, determinadas por medio de una orden específica de Strahler. Cada unidad consta de 5 zonas a modelar, en cada una, se simulan los flujos de agua en función de un procedimiento de integración de las ecuaciones de conservación de masa y momento. Los flujos simulados son (1) flujo insaturado, (2) flujo saturado, (3) flujo superficial saturado, (4) flujo superficial concentrado y (5) flujo de cauce, como se muestra en la Figura 9.

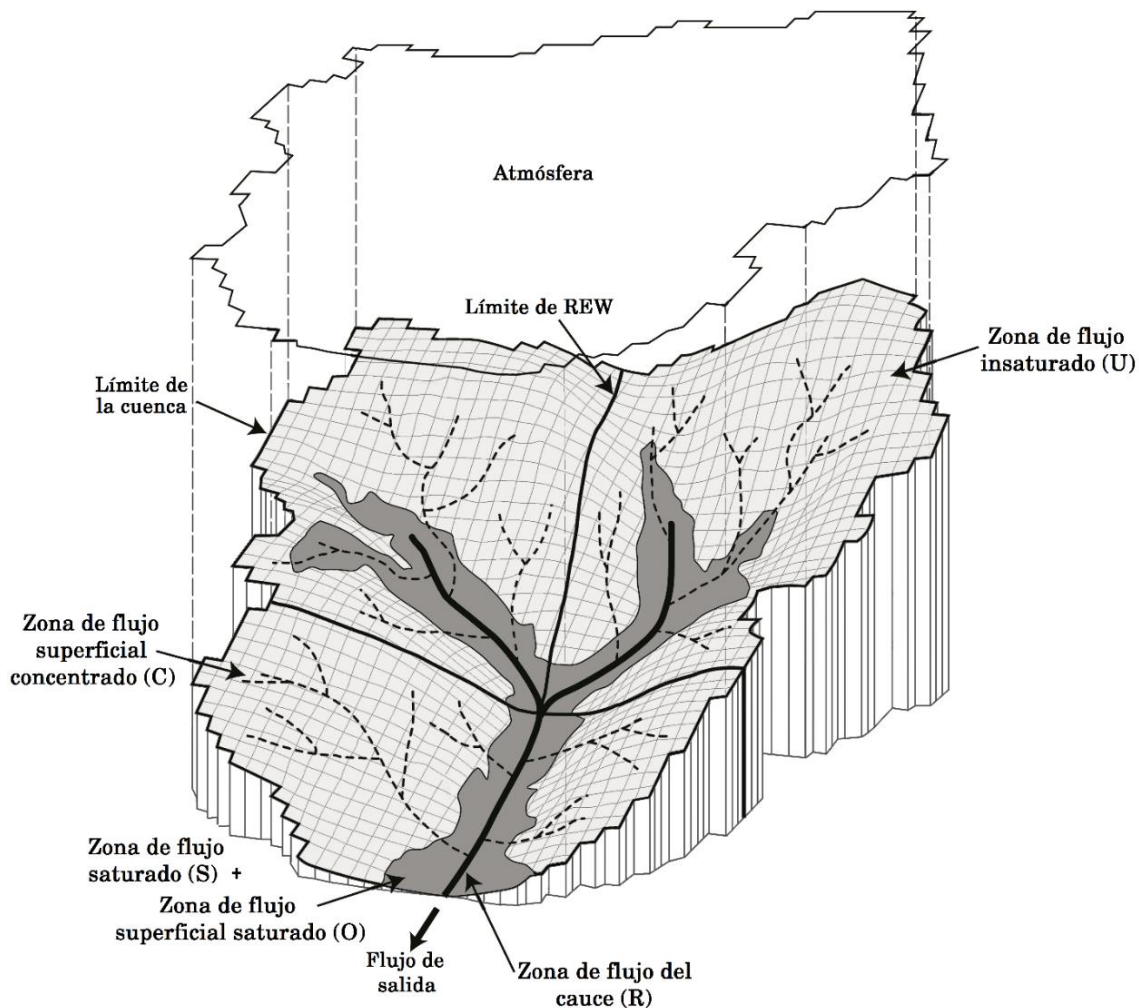


Figura 9. Vista en tercera dimensión de un conjunto de REWs.

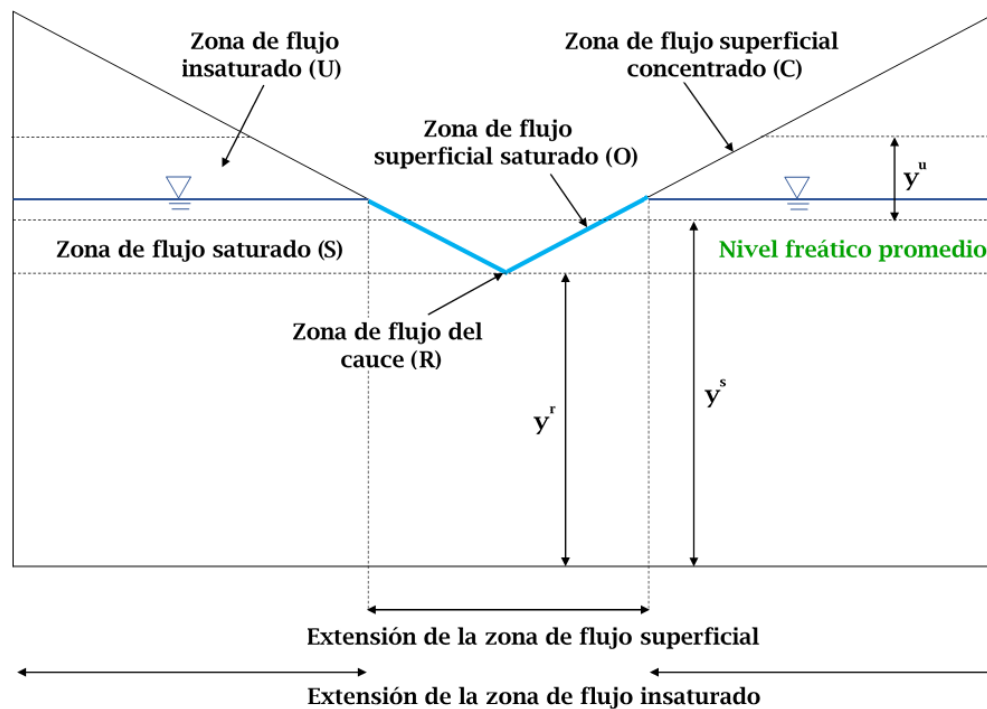
MODIFICADO DE REGGIANI *ET AL.* (1998)

En el enfoque REW, la división que se hace por subregión se diferencia por sus características físicas, así como las distintas escalas temporales típicas del flujo dentro de cada zona o dominio considerado (Figura 10) (Reggiani *et al.*, 1998).

- Subregión U: Se refiere a la **zona de flujo insaturado**, incluye los volúmenes de suelo, agua y gas, confinados en la parte superior por la superficie terrestre y en la parte inferior hacia la zona saturada por la capa freática.
- Subregión S: Comprende la **zona de flujo saturado**, contiene los volúmenes del suelo y el agua subyacente a la zona insaturada. En este caso, la fase acuosa, a diferencia de la zona no saturada, solo coexiste con la fase sólida. El límite superior físico de esta subregión está dado por el nivel freático; su límite inferior, se establece por una profundidad límite que llega al acuífero o por la presencia de estratos impermeables.
- Subregión O: Es el volumen de **flujo superficial saturado**, que se forma en las caras de filtración y dentro de la red subyacente a las unidades REW que se encuentran dentro de la porción saturada de la superficie terrestre.
- Subregión C: También llamado **flujo superficial concentrado**, se encuentra integrado por la red de canales, arroyos, cárcavas, corrientes efímeras y áreas de flujo superficial de Horton dentro de la porción insaturada de la superficie terrestre, Forman un volumen de agua que fluye hacia el canal principal y se fusiona con el flujo superficial saturado.
- Subregión R: La **zona de flujo del cauce** está conformada por el volumen ocupado por el cauce principal de una unidad REW determinada. Este se forma por entradas laterales desde la zona adyacente flujo superficial saturado (subregión O) y por precipitación directa desde la atmósfera.

Las subregiones definidas previamente incluyen una o más fases. El flujo en los cauces y en la región de flujo superficial es flujo de una fase, mientras que para las regiones de flujo subsuperficial debe considerarse la coexistencia de dos o tres fases. Las propiedades termodinámicas se intercambian entre las diferentes fases dentro de la misma subregión, entre diferentes subregiones y entre las REWs (Reggiani, 2001).

Los modelos que se basan en el enfoque REW comparado con otros modelos hidrológicos, presentan ventajas de poseer un bajo número de parámetros y requiere pocos esfuerzos computacionales. Esencialmente, se busca que las leyes de balance de masa y momento se promedien espacialmente sobre la REW y las relaciones constitutivas como la ley de Darcy, fórmula de Chézy y ecuación de Saint Venant, se deriven directamente a una escala de REW; cada REW es una unidad espacialmente agrupada, representada por parámetros y variables promediados (Fenicia *et al.*, 2003).



**Figura 10.** Dominios o zonas del modelo representadas en sección transversal de una unidad REW. MODIFICADO DE FENICIA *ET AL.* (2003)

### 5.7.1. Antecedentes del enfoque termodinámico

Las predicciones de las respuestas hidrológicas anteriormente requerían la evolución temporal adaptativa de la vegetación, los suelos y las redes fluviales bajo cambios ambientales inducidos por el hombre; por ello, se buscó desarrollar el enfoque REW haciendo referencia a una nueva comprensión de cómo todos los componentes asociados (clima, suelos, vegetación y topografía) han coevolucionado en el pasado y cómo podrían hacerlo en el futuro (Waegner *et al.*, 2010).

En 2006, Zehe *et al.* utilizaron CATMOD (un modelo distribuido) para hacer simulaciones de una cuenca en Alemania y posteriormente complementar esta aplicación con el modelo CREW como una herramienta para ampliar la escala a fin de desarrollar relaciones constitutivas para el almacenamiento-descarga a escala de REW.

Subsecuente a ese estudio, se observó que el modelo tendía a emular la simulación que presentaba CATMOD que lo que realmente sucedía en la cuenca; entonces, Zhang *et al.* (2006) calibraron los valores efectivos de los parámetros en el modelo REWASH; los autores introdujeron un dominio de flujo de macroporos, que mejoró considerablemente el desempeño del modelo cuando se aplicó a la cuenca Attert.

En las últimas décadas, se han realizado diversas aplicaciones de modelos basados en el enfoque REW, los modelos principales que se encuentran en la literatura son: REW (Fenicia *et al.*, 2005; Reggiani y Rientjes, 2005; Varado *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2015), CREW (Lee *et al.*, 2007; Zehe *et al.*, 2006), REWASH (Zhang y Savenije, 2005; Zhang *et al.*, 2006) y THModel, posteriormente renombrado a THREW (Mou *et al.*, 2008; Tian *et al.*, 2008, 2012; Li *et al.*, 2012, 2018; Liu *et al.*, 2012). El uso de estos modelos se ha contrastado en diferentes climas; además, este tipo de modelos asumen que la física a pequeña escala se puede utilizar a escalas mayores solo con un cambio de parámetros efectivos.

La diferencia el enfoque de REW con otros radica en la manera en la cual requiere que las ecuaciones de balance de masa, momento, energía y entropía se consideren de manera integral y consistente en la escala de una disgregación discreta del paisaje en los elementos básicos representativos de la cuenca (unidades REW) (Beven, 2012).

### 5.8. Estructura del modelo REW

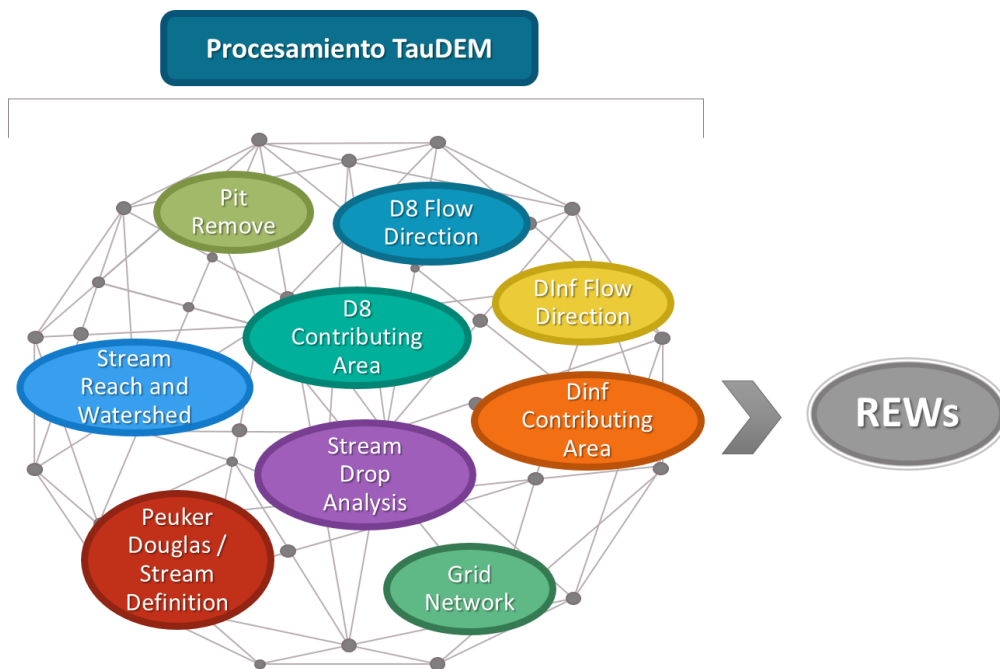
El modelo REW consiste de una serie de paquetes o módulos ejecutables, así como pasos intermedios que deben realizarse después de la instalación, estos se describirán brevemente a continuación:

- (1) Análisis de la cuenca TAUDM
- (2) Análisis REW/REC
- (3) Preprocessor
- (4) Solver
- (5) Postprocessor

### 5.8.1. Análisis de la cuenca TAUDEM

El paquete TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) consta de un conjunto de herramientas que se encargan del preprocesamiento de la información topográfica y la extracción de las características de la red de flujo, así como la delineación de subcuencas (Band, 1986, Tarboton *et al.* 1991, 1992, Tarboton, 1997).

Utilizar el conjunto de herramientas TauDEM, permite la optimización general del modelo de elevación digital y la obtención de las unidades REW (Figura 11); sus algoritmos de análisis hidrológico y procedimiento general consiste en lo siguiente.



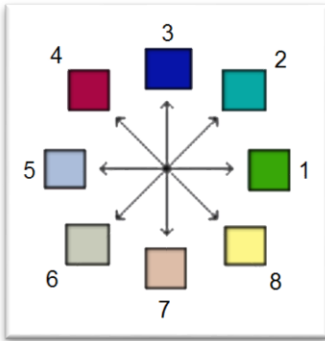
**Figura 11.** Procesamiento llevado a cabo por TauDEM para la obtención de REWs.

Aplica la herramienta de remoción de depresiones topográficas (*Pit Remove*) al MED para rellenar cualquier hueco; su función es elevar la altura de las depresiones, igualando la elevación de los píxeles a lo largo de su borde. Esto mejora la exactitud de los cálculos hidrológicos que, de otro modo, canalizarían el agua a los pozos, dando lugar a errores.

Calcula las direcciones de flujo D8 y Dinf (*D8 Flow Direction*, *D-Infinity Flow Direction*), estos cálculos producen un raster de pendiente y otro que indica la pendiente descendente más pronunciada desde un píxel a uno de sus vecinos; el primero en ocho direcciones y el segundo en direcciones infinitas.



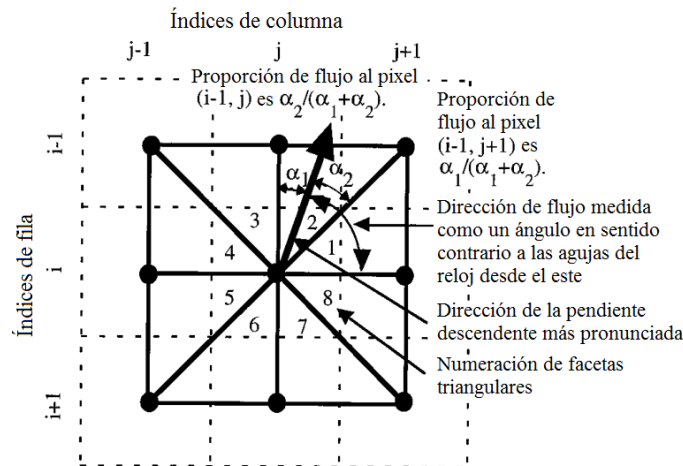
Para el primer caso (D8), la trayectoria que sigue la dirección del flujo a través de áreas planas, se realiza de acuerdo con el método descrito por Garbrecht y Martz (1997); aquí, los autores describen cómo para cada celda, se toma en cuenta la dirección de uno de sus ocho vecinos adyacentes o diagonales con la pendiente descendente más pronunciada (Figura 12).



**Figura 12.** Codificación de dirección de flujo: 1 - Este, 2 - Noreste, 3 - Norte, 4 - Noroeste, 5 - Oeste, 6 - Suroeste, 7 - Sur, 8 - Sureste.

En cuanto a D-inf, las primeras aproximaciones de Tarboton (1997), implicaban el cálculo de las direcciones de flujo por pixel, no solo en 8 rumbos, como se hacía anteriormente Garbrecht, y Martz (1997), si no en direcciones infinitas, dando paso así, a lo que se conoce como *infinity flow*; este método utiliza la pendiente más pronunciada de una faceta triangular para asignar una dirección de flujo.

La dirección del flujo se codifica como un ángulo en radianes en el sentido contrario a las manecillas del reloj, tomando el este como una cantidad continua (punto flotante) entre 0 y 2 pi. El ángulo de dirección de flujo se define como la dirección de la pendiente descendente más pronunciada sobre las ocho facetas triangulares formadas en una ventana de celda de cuadrícula de 3 x 3 centrada el pixel de interés (Figura 13). El flujo resultante en un grid o cuadrícula, es proporcional entre las dos celdas vecinas que definen la faceta triangular con la pendiente descendente más pronunciada (Tarboton, 1997).



**Figura 13.** Dirección de flujo definida como la pendiente descendente más pronunciada sobre las facetas triangulares en un pixel. MODIFICADO DE TARBOTON (1997).

El módulo utiliza la función de área de contribución D8 y/o Dinf para contar el número de píxeles que drenan a través de cada píxel, el raster de área de contribución es calculado como la contribución propia de cada celda más la contribución de los vecinos ascendentes que se drenan hacia él de acuerdo con método elegido, D8 o Dinf.

El raster de salida se utiliza para la definición de corrientes por el método de Peuker Douglas. Esta herramienta, combina otras que se pueden utilizar individualmente (Peuker Douglas, D8 *Contributing Area*, *Stream Drop Analysis* y *Stream Definition by Threshold*); como resultado, se obtienen la "red de flujo" y dos rasters más.

El algoritmo que utiliza la herramienta Peuker Douglas consiste en marcar puntos convexos y cóncavos hacia arriba como puntos de cresta y corriente, respectivamente. Para definir las corrientes, se marca el píxel con la elevación más alta y después de un barrido en la matriz, los píxeles sin marcar representarán los cursos de drenaje; las líneas de cresta se obtienen de manera similar (Band, 1986).

El propósito del algoritmo no es necesariamente delinear un sistema de manera completa, sino extraer un conjunto de segmentos que puedan servir como base para crecer y conectar el resto del sistema de drenaje; esto tiene el efecto de reducir significativamente el número de píxeles que deben ser inspeccionados en todas las etapas subsiguientes.

La herramienta final y más importante es la que permite la obtención de las unidades REW, la herramienta "alcance de la corriente y cuenca" o *Stream Reach and Watershed* requiere del MED relleno o sin pozos, los rasters de dirección de flujo y área de contribución, así como la de red de flujo, creada en el paso anterior.

El resultado es un raster que muestra polígonos definidos como REWs individuales, o bien, la delineación del área de estudio. La cantidad de unidades generadas va a depender del valor umbral que se asigne, (threshold value).

#### **5.8.1.1. Insumos meteorológicos requeridos**

Aparicio (1992) menciona que la disposición de datos básicos adecuados es esencial en todas las ciencias y tanto la recolección, como el análisis de datos, son fundamentales para la Hidrología.



Los datos meteorológicos requeridos por el modelo REW consisten de una serie temporal de igual periodo, de las variables de: precipitación, temperatura máxima y mínima, evaporación potencial, humedad relativa y temperatura diurna.

Esta información se integra al centroide de cada REW, los centroides pueden ser generados por preprocesamiento externo, utilizando los polígonos de las unidades REW generadas por el módulo TAUDEM y así definir sus centroides geométricos. Como paso final, se debe concentrar la información en un archivo con formato NetCDF

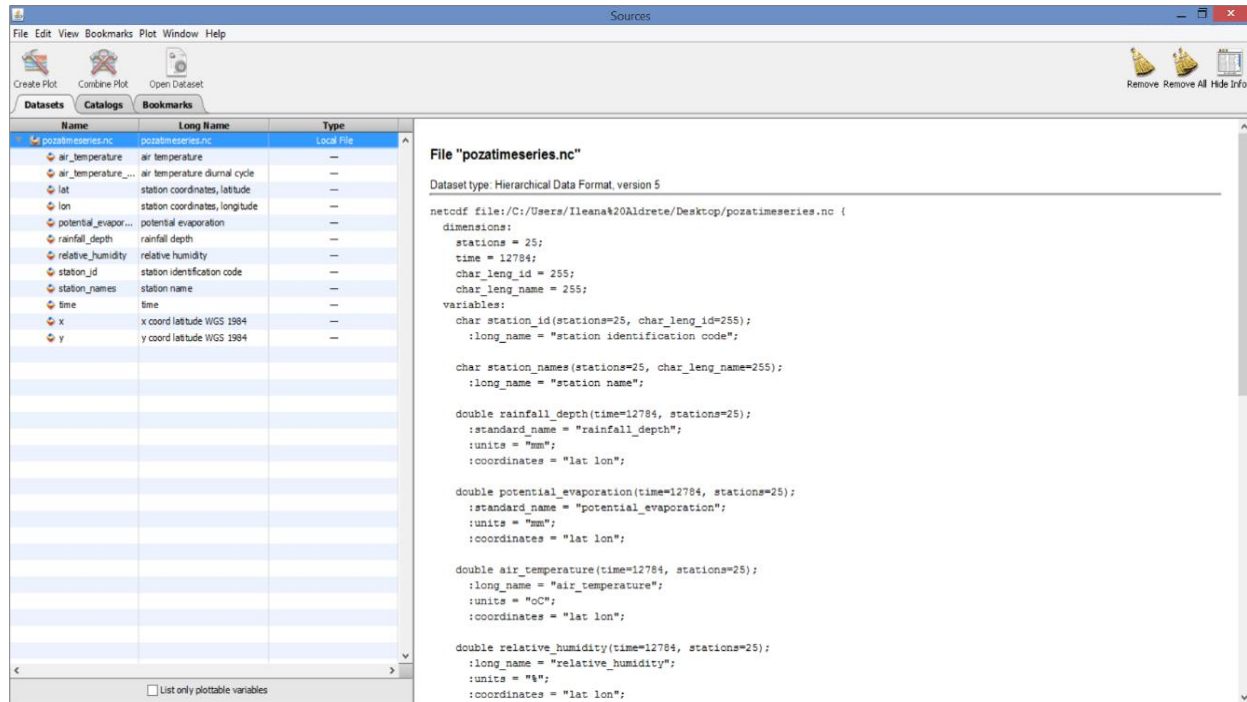
#### **5.8.1.2. Serie temporal en formato NetCDF**

El formato NetCDF (*Network Common Data Format*) fue creado en 2008 como un formato estándar que utilizan softwares de la comunidad científica. Es un formato de datos autodescriptivo, e independiente de la arquitectura de la computadora; permite crear, acceder y compartir datos científicos orientados a arreglos en forma de matrices. Uno de los objetivos de este formato es apoyar el acceso eficiente a pequeños subconjuntos de grandes conjuntos de datos (Rew *et al.*, 2011).

Al ser autodescriptivo, un acervo de datos incluye los detalles que definen la información que ahí se contiene, es decir, que un archivo comprende la suficiente información para poder saber qué clase de datos se encuentran en él (tipo de variable, unidades, dimensiones, etc.) a diferencia de otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación (Severance, 2013).

Otra de las características del formato NetCDF es la portabilidad y compresión; los datos en un conjunto se representan de tal manera que se puede acceder a ellos mediante computadoras con diferentes formas de almacenar enteros, caracteres y números de punto flotante; se puede manipular este tipo de archivo por cualquier equipo que tenga sus librerías instaladas en el disco duro (Rew *et al.*, 2011).

A pesar de ser un formato que presenta muchas ventajas, como la fácil compresión de una gran cantidad de datos y permitir al usuario definir grupos y estructuras en el mismo; el principal obstáculo de NetCDF es que no se puede acceder directamente al fichero, si no que se debe utilizar software específico (Figura 14). Cabe señalar que este tipo de archivo es uno de los insumos que requiere el modelo y se debe incluir en una de las subcarpetas del mismo.



**Figura 14.** Visualización de archivo NetCDF con Panoply®.

## 5.8.2. Análisis REW/REC

Este paquete consiste de un par de aplicaciones: Rewanalysis.exe y Recanalysis.exe.

El primero identifica las REWs como regiones espaciales tridimensionales, establece su inter-conectividad, y calcula sus cantidades geométricas específicas, como áreas, elevación superficial promedio, entre otras.

El segundo lleva a cabo la subdivisión de la zona insaturada en columnas verticales y les asigna la información complementaria de uso de suelo, elevación, infraestructura, existencia de presas (en caso de aplicar), etc.

## 5.8.3. Preprocessor

Este paquete se encarga de preparar todos los insumos necesarios para la aplicación Solver.exe; asigna todas las propiedades necesarias del material, tales como las conductividades hidráulicas, geometría del cauce, estructura de datos, etc. a las REWs y sus respectivas zonas. En general, cumple con una serie de operaciones, preliminares a las simulaciones:

- Asignar los parámetros del modelo a las diferentes entidades (REWs).
- Preprocesar la información de precipitación por medio del método de Kriging para cada REW.
- Definir la presencia de alguna presa para determinada REW (opcional).
- Asignar condiciones iniciales y limitantes al modelo, para cada REW.

### 5.8.3.1. Archivo de parámetros del preprocesador

El archivo de parámetros se encuentra organizado como una serie de bloques que cumplen con comandos específicos del modelo (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Funciones del archivo de parámetros del preprocesador

Bloque	Función
1	Contiene información hidráulica, como los coeficientes de Manning, geometría de los canales, conductividad hidráulica en el lecho del canal, entre otros.
2	Contiene los datos hidráulicos que se atribuirán uniformemente a la zona subsuperficial.
3	Contiene toda la información inherente a Kriging y las series de tiempo.
4	Contiene la asignación de presas a REWs específicas.
5	Contiene los parámetros para el modelo de balance de energía de la nieve.
6	Contiene los datos inherentes al método del elemento finito utilizado para ajustar el lecho rocoso.
7	Contiene la configuración de rutas que hace referencia a los directorios de entrada y salida del modelo.
8	Contiene algunos modificadores en los formatos de archivo de E/S.

### 5.8.3.2. Archivos de condiciones iniciales y finales

La carpeta Ascii, del directorio de trabajo, contiene los archivos con terminación .bc y .init; el primero, siendo el que engloba las condiciones iniciales y limitantes y el segundo, un archivo que contiene las cantidades geométricas de la cuenca, tales como las áreas superficiales, áreas de contribución, de unión entre afluentes, etc.

En el archivo de condiciones iniciales y limitantes, un aspecto importante, es definir los valores de flujo/no flujo para el límite de la cuenca. Por default el valor será 0, si una REW se encuentra situada dentro de la cuenca (o no cuenta con límite externo); se debe asignar el valor de 1, si la REW abarca una parte del límite externo, y si ese límite se debe modelar como límite de flujo, se debe establecer el valor de 2, de manera manual y guardar los cambios.

### 5.8.4. Solver

Este paquete se encarga de ejecutar la simulación hidrológica y resolver las ecuaciones. Una vez que termina dicho proceso, se obtienen los resultados para cada REW con extensión ".out"; dicha extensión permite el acceso a los archivos por medio de un procesador de texto, o bien, se puede ejecutar el paquete Postprocesador.exe. Los pasos que se realizan como parte del módulo Solver, se muestran en la Figura 15.

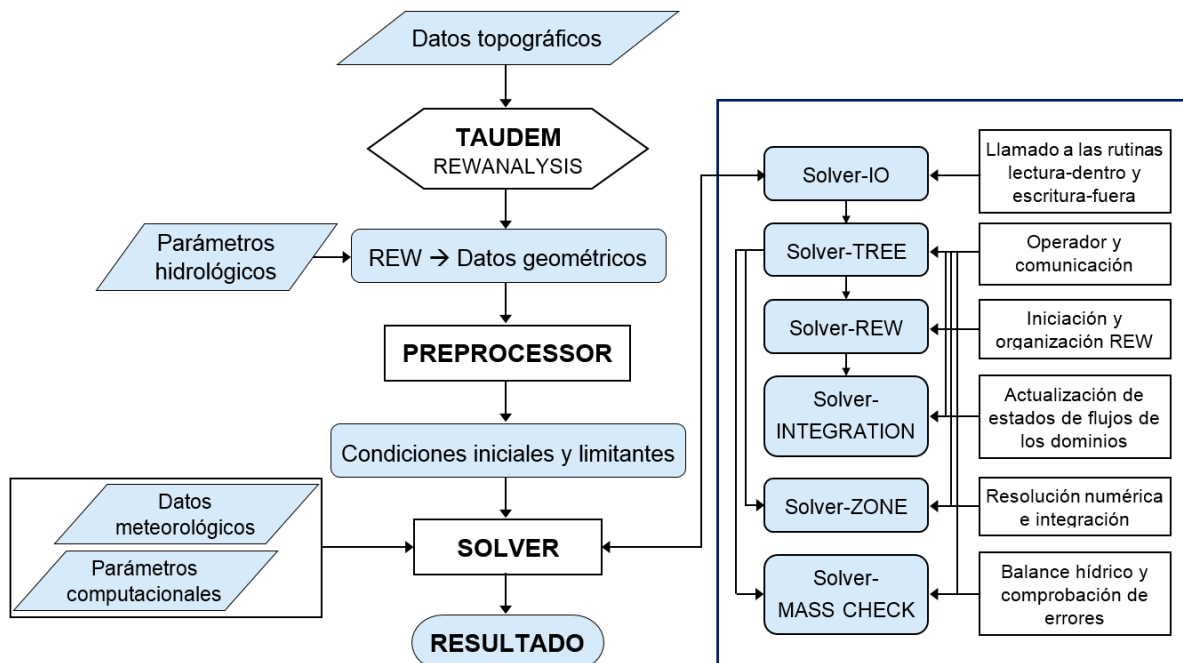


Figura 15. Diagrama de flujo de los procesos del módulo Solver. Modificado de Zhang, 2007.

### 5.8.5. Postprocessor

Su función es transformar los archivos de salida de la simulación, a algún formato específico, ya sea Matlab, NetCDF o XML.

## **5.9. Calibración y validación de modelos**

*La calibración* del modelo consiste en cambiar los valores de los parámetros del modelo en un intento de ajustar las condiciones del campo dentro de un rango aceptable. Es evidente que el éxito de cualquier procedimiento de calibración depende en gran medida de la naturaleza (cantidad y calidad) de los datos utilizados (Taibi *et al.*, 2011).

Diferentes conjuntos de parámetros de modelos calibrados pueden producir simulaciones hidrológicas divergentes que a su vez pueden conducir a decisiones operativas o conclusiones científicas diferentes. En las cuencas que cuentan con registros temporales de descargas observadas, se pueden emplear modelos, si se calibran en eventos observados (Bárdossy, 2007).

Las mejoras en los procedimientos de calibración para los modelos hidrológicos pueden separarse en dos categorías estrechamente interconectadas: (1) la modificación de las técnicas de optimización y (2) el uso de datos complementarios para la calibración. La primera categoría incluye técnicas tales como procedimientos de calibración multiobjetivo y el uso de restricciones, mientras que la segunda implica el uso de datos medidos o complementarios (evapotranspiración, contenido de humedad del suelo, etc.) en el procedimiento de calibración (Minville *et al.*, 2014).

*La validación* del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período diferente. Según Torres *et al.* (2005), el ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo.

Refsgaard y Knudsen (1996) mencionan que, en la validación de una cuenca, se pretende determinar la capacidad del modelo calibrado, para continuar simulando de manera adecuada, sin el ajuste de parámetros, durante un periodo de tiempo adicional.

### 5.10. Eficiencia predictiva de modelos

El grado de confiabilidad del modelo hidrológico se basa en qué tan bien el modelo puede reproducir la descarga de un río en comparación con el aforo observado (Elgamal *et al.*, 2017).

Existen diferentes índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo; a continuación se presentarán los de interés para esta investigación: Índice de eficiencia Nash-Sutcliffe y Coeficiente de determinación, denominado  $r^2$ .

**a) Índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE):** Fue propuesto en 1970 por los autores de mismo apellido; se trata de un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de los datos medidos.

Este índice produce resultados en rangos menores o iguales a 1; Moriasi *et al.* (2007) sugieren que si el valor es cercano a 1 la eficiencia de la predicción es mayor, a cero, la media de los datos observados tiene una capacidad de predicción similar al modelo e inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo cual implica que los valores simulados son poco confiables (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Valores de referencia del coeficiente de Nash-Sutcliffe.

NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

**b) Coeficiente de determinación ( $r^2$ ):** De acuerdo con Santhi *et al.* (2001), mide la variación de los datos observados con respecto a los simulados por el modelo en una escala de valores de 0 a 1.



Nagelkerke (1991) señaló que el coeficiente de determinación posee las siguientes propiedades:

- Su valor se maximiza mediante la estimación de máxima verosimilitud de un modelo;
- Es asintóticamente independiente del tamaño de la muestra;
- La interpretación es la proporción de la variación explicada por el modelo;
- Los valores están entre 0 y 1, donde 0 indica que el modelo no explica ninguna variación y 1 indica que explica perfectamente la variación observada;
- No tiene ninguna unidad.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 6.1. Localización

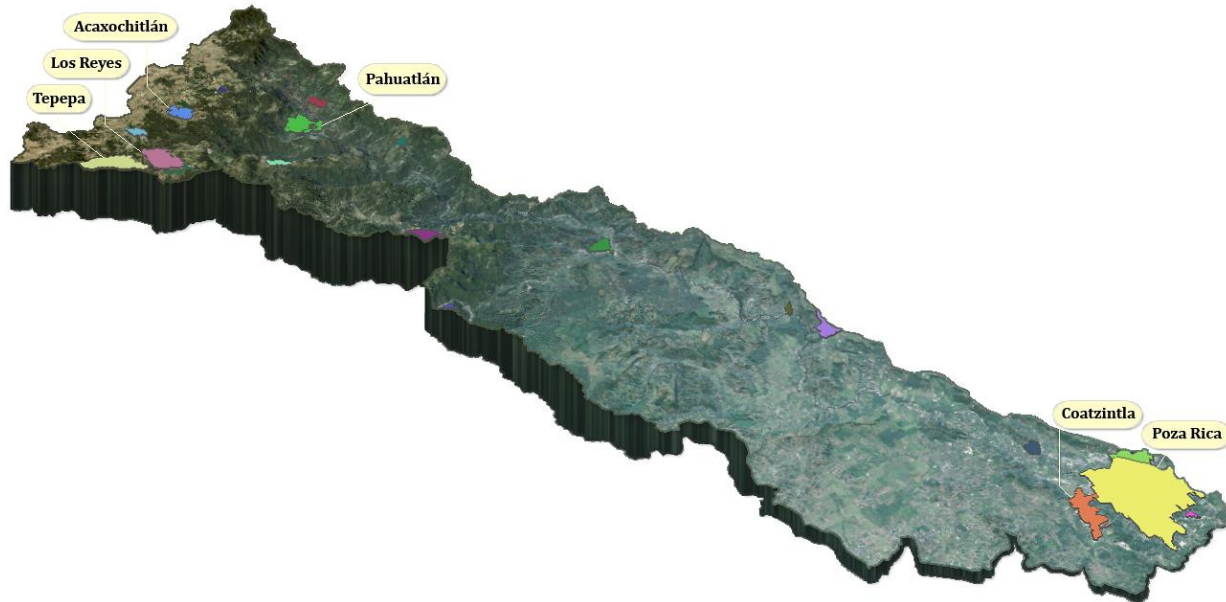
La cuenca San Marcos se localiza en la región de la Sierra Norte del estado de Puebla, México, y pertenece a la región hidrográfica RH27-Tuxpan-Nautla; cuenta con una superficie total de 1,635 km<sup>2</sup> y está ubicada dentro de las siguientes coordenadas extremas, 20° 34' y 2° 0' Latitud Norte; 97° 23' y 98° 20' Longitud Oeste. El territorio está comprendido dentro de los estados de Puebla, Veracruz e Hidalgo en las siguientes proporciones: 54.9%, 31.9% y 13.3%, respectivamente (Figura 16).



**Figura 16.** Ubicación del área de estudio.

Los 21 municipios que integran la cuenca son: Acaxochitlán, Coatzintla, Coyutla, Cuautepec, Espinal, Honey, Huauchinango, Jalpan, Juan Galindo, Metepec, Naupan, Pahuatlán, Papantla, Poza Rica, Tenango, Tihuatlán, Tlacuilotepec, Tulancingo, Venustiano Carranza, Xicotepec y Zihuateutla. Las ciudades más importantes en cuanto a desarrollo socioeconómico se pueden ubicar en la Figura 17.





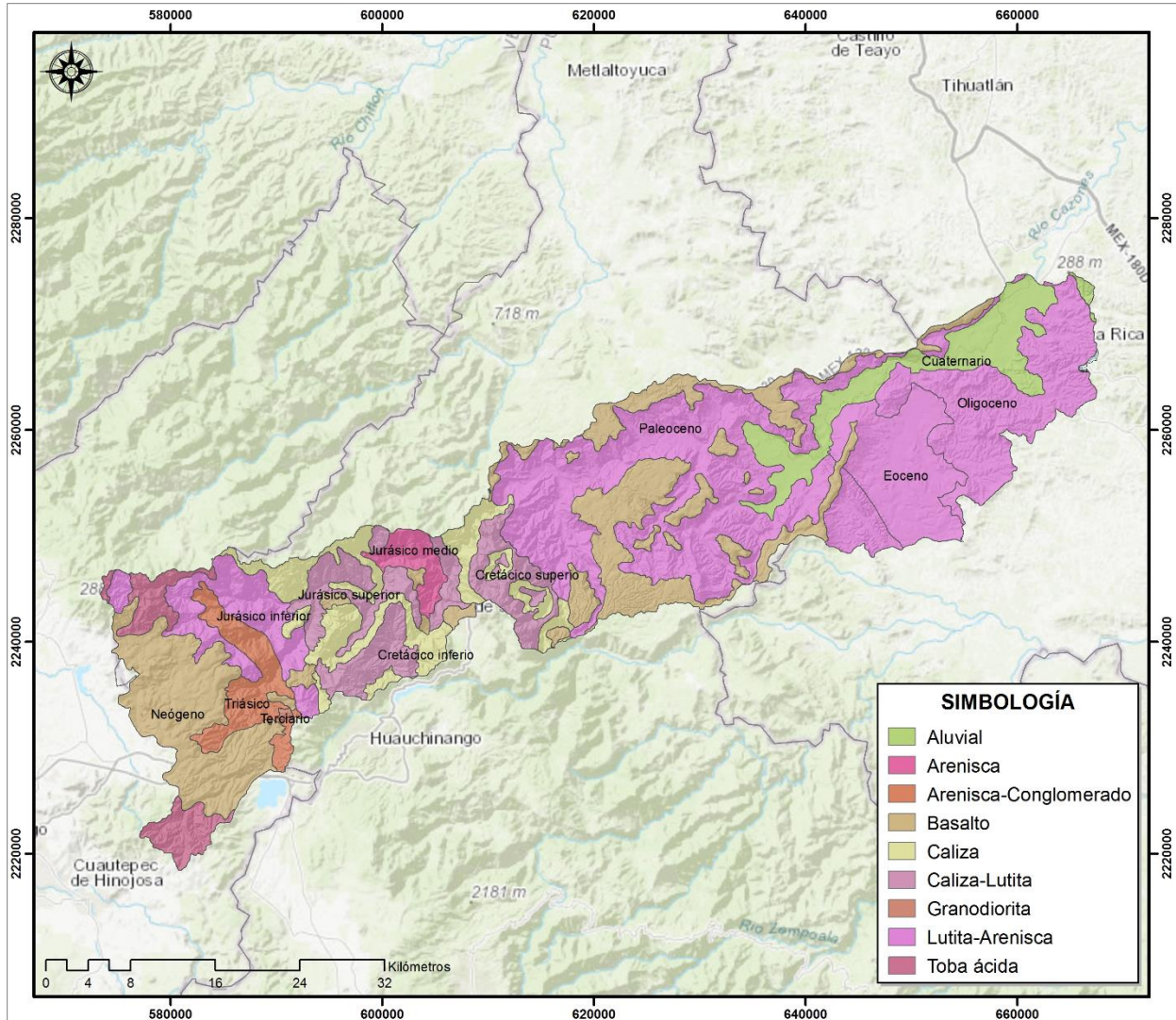
**Figura 17.** Ciudades principales de la cuenca San Marcos.

## 6.2. Fisiografía y Geología

La región en la que se sitúa el área de estudio presenta características fisiográficas y geológicas propias y singulares, como un relieve abrupto caracterizado por cañones morfológicos, depresiones estructurales que delimitan paredes altas que encajonan los cauces de ríos, así como la infraestructura misma del sistema (SRH, 1970). En ella se presenta una secuencia litológica de rocas sedimentarias plegadas, tectonizadas e intrusiones de cuerpos ígneos que varía en edad desde el Jurásico hasta el Cuaternario.

El área está ubicada en la porción más oriental de la Sierra Madre Oriental, así como en la parte frontal de las provincias fisiográficas denominadas Mesa Central y Faja Costera del Golfo de México.

Tomando como base la porción más occidental de la región, en la parte alta de la cuenca, afloran rocas volcánicas del Cenozoico Medio y Superior, los cuales ofrecen una alta resistencia a los derrumbes y procesos erosivos naturales. A su vez, dichos materiales se encuentran en discordancia petrográfica en la parte media de la cuenca con areniscas, lutitas y calizas del Jurásico y Cretácico Superior, rocas que generalmente afloran a lo largo de la Sierra Madre Oriental (Figura 18).



**Figura 18.** Geología de la cuenca San Marcos. (INEGI, 1980)

Sobre el flanco oriental de la sierra, además de calizas, lutitas y areniscas, se presentan magras y conglomerados del Cretácico Superior, Paleoceno, Eoceno y Oligoceno. Esta área se considera la más frágil de la cuenca al presentar la mayor cantidad de procesos erosivos y deslizamientos; esto se debe a la composición y antigüedad de sus materiales geológicos (SRH, 1970).

La parte baja de la cuenca corresponde a la Llanura Costera del Golfo de México, ahí afloran unidades geológicas del Terciario. Esta parte se encuentra formada por lomeríos cercanos a la llanura costera de Veracruz; más que tener procesos erosivos, esta zona se caracteriza por los procesos de sedimentación causados por el aporte fluvial proveniente de la cuenca alta.



### 6.3. Edafología

El componente edáfico de la cuenca<sup>1</sup> se caracteriza por tener suelos de tipo Acrisol, Andosol, Cambisol, Kastañozem, Leptosol, Luvisol, Nitisol, Phaeozem, Regosol, Umbrisol y Vertisol (Figura 19). A continuación, se presenta una breve descripción de los tipos edáficos identificados en el área de estudio (Deckers *et al.*,1998).

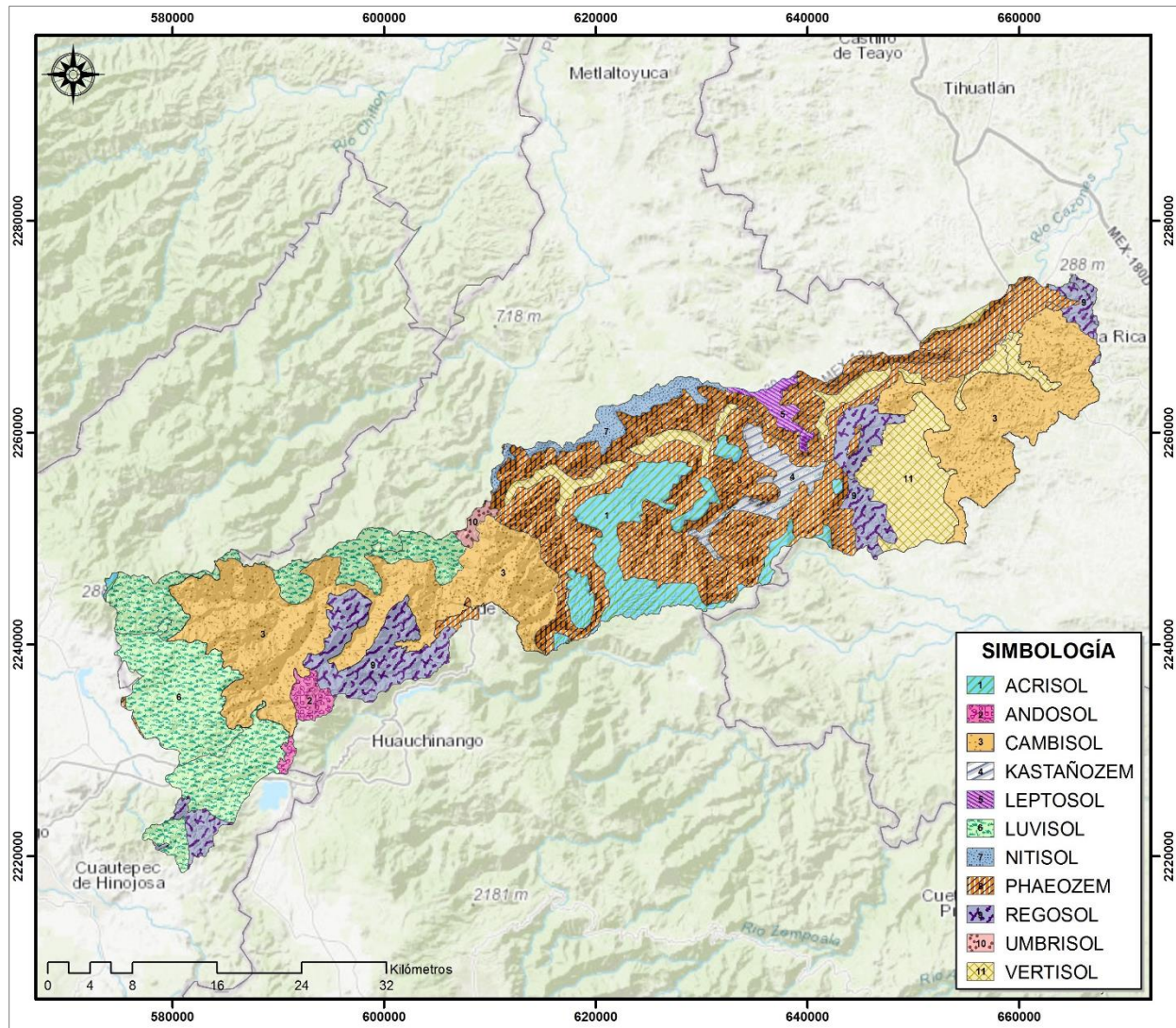


Figura 19. Edafología de la cuenca San Marcos. (INEGI, 2006)

**Acrisoles (AC):** Son suelos ácidos, fuertemente meteorizados con baja saturación y bases en alguna profundidad, se caracterizan por ser pobres en nutrientes para aprovechamiento forestal y pecuario, tienden a presentar una productividad baja.

<sup>1</sup> Los tres tipos de suelo predominantes en la cuenca son Cambisol y Phaeozem, ambos con 27% de cobertura y Luvisol con 16%.

**Andosoles (AN):** Son suelos derivados de cenizas volcánicas, recientes, ligeros, y con alta capacidad de retención de agua y nutrientes. Su material parental se conforma por vidrios y eyecciones volcánicas (principalmente ceniza, pero también tufa, pómez y otros) u otro material rico en silicato.

Los Andosoles tienen un alto potencial para la producción agrícola, pero muchos de ellos no se usan hasta su capacidad; son fáciles de cultivar y tienen buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua, sin embargo, cuando están fuertemente hidratados son difíciles de laborear por su baja capacidad de carga y adhesividad. Normalmente se cultivan con una variedad amplia de cultivos incluyendo caña de azúcar, camote, té, vegetales, trigo y cultivos hortícolas; en pendientes pronunciadas se mantienen mejor bajo bosque.

**Cambisoles (CM):** Son suelos que tienen por lo menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo, evidentes por cambios en la estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato. Su material parental es de textura media a fina derivada de un amplio rango de rocas.

Este tipo de suelos generalmente conforman buenas tierras agrícolas y se usan intensivamente; los cambisoles con alta saturación de bases en la zona templada están entre los suelos más productivos, mientras que los más ácidos, se usan para agricultura mixta y como tierras de pastoreo y forestales.

**Kastañozems (KS):** Son suelos pardo-oscuros, ricos en materia orgánica; su material parental consta de un rango amplio de materiales no consolidados y una gran parte de este tipo de suelos se ha desarrollado sobre loess. La falta periódica de humedad del suelo es el obstáculo principal para alcanzar rendimientos altos por lo que el pastoreo extensivo es uno de los usos más importantes que se da a los Kastañozems.

**Leptosoles (LP):** Son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos; particularmente comunes en regiones montañosas, se presentan principalmente tierras en altitud media o alta con topografía fuertemente disectada. Estos suelos son un recurso potencial para el pastoreo en estación húmeda y tierra forestal; sin embargo, el drenaje interno excesivo y la poca profundidad de muchos Leptosoles pueden causar sequía aún en ambientes húmedos.

**Luvisoles (LV):** Son suelos ricos en nutrientes con horizonte cálcico o presencia de material calcáreo al menos en la superficie; tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla). Su material parental tiende a presentar una amplia variedad de materiales no consolidados incluyendo till glaciario, y depósitos eólicos, aluviales y coluviales.

La mayoría de los luvisoles son suelos fértiles y apropiados para un rango amplio de usos agrícolas; en la zona templada se cultivan ampliamente con granos pequeños, remolacha azucarera y forraje; en áreas en pendiente, se usan para huertos, forestales y/o pastoreo.

**Nitisoles (NT):** Son suelos rojos tropicales profundos, bien drenados, con límites difusos entre horizontes y un horizonte subsuperficial con por lo menos 30 por ciento de arcilla y estructura en bloques angulares. Los Nitisoles están entre los suelos más productivos de los trópicos húmedos; la profundidad, porosidad y la estructura del suelo estable, permite enraizamiento profundo y hace a estos suelos bastante resistentes a la erosión.

El fácil laboreo de los Nitisoles, su buen drenaje interno y buenas propiedades de retención de agua se complementan con propiedades químicas (fertilidad), además tienen contenidos relativamente altos de minerales meteorizables, y el suelo superficial puede contener elevado porcentaje de materia orgánica, en particular bajo bosque o cultivos forestales. Algunos de los usos principales para este tipo de suelos son cultivos de plantación como cacao, café, caucho y piña.

**Phaeozems (PH):** Estos suelos cuentan con una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes; son profundos, porosos y muy fértiles, siendo excelentes tierras agrícolas, aptas para gran variedad de cultivos; sin embargo, son sumamente propensos a la erosión hídrica y eólica. Vastas áreas de Phaeozem se utilizan para cría y engorda de ganado.

**Regosoles (RG):** Se caracterizan por no presentar capas distintas y derivarse de material no consolidado, son suelos muy poco desarrollados, muy parecido al material de origen.

Los Regosoles con 500-1000 mm/año de lluvia necesitan riego para una producción satisfactoria de cultivos dada su baja capacidad de retención de humedad. Muchos Regosoles se usan para pastoreo extensivo y los que se encuentran en regiones montañosas se consideran frágiles por lo que es mejor dejarlos bajo bosque.

**Umbrisoles (UM):** Son suelos con superficie oscura cuyo material parental proviene de material meteorizado de rocas silíceas; estos suelos acumulan materia orgánica dentro del suelo superficial mineral (en la mayoría de los casos con baja saturación con bases) hasta el punto en que afecta significativamente el comportamiento y la utilización del suelo.

Muchos Umbrisoles están bajo vegetación natural o casi-natural; la predominancia de tierras en pendiente y condiciones climáticas húmedas y frescas restringe su utilización para el pastoreo extensivo además de su susceptibilidad a la erosión. Su principal uso se centra en la introducción de pastos mejorados y corrección del pH del suelo por encalado.

**Vertisoles (VR):** Son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan.

Los usos agrícolas de los vertisoles van desde muy extensivos (pastoreo, recolección de leña, y quema de carbón) hasta agricultura bajo riego a pequeña escala (arroz) y gran escala (algodón, trigo, cebada, sorgo, garbanzos y caña de azúcar). Los cultivos forestales generalmente son menos exitosos porque las raíces de los árboles encuentran difícil establecerse en el subsuelo y se dañan cuando el suelo se expande y se contrae.

#### **6.4. Uso del suelo**

De acuerdo con la Serie VI de INEGI (2016), de la superficie ocupada por los diferentes tipos de uso, la que ocupa la mayor extensión en la cuenca es la destinada a la agricultura de cultivos permanentes y semipermanentes, del mismo modo se puede observar la medida en la cual la vegetación secundaria ha aumentado su extensión a lo largo de la cuenca (Figura 20).



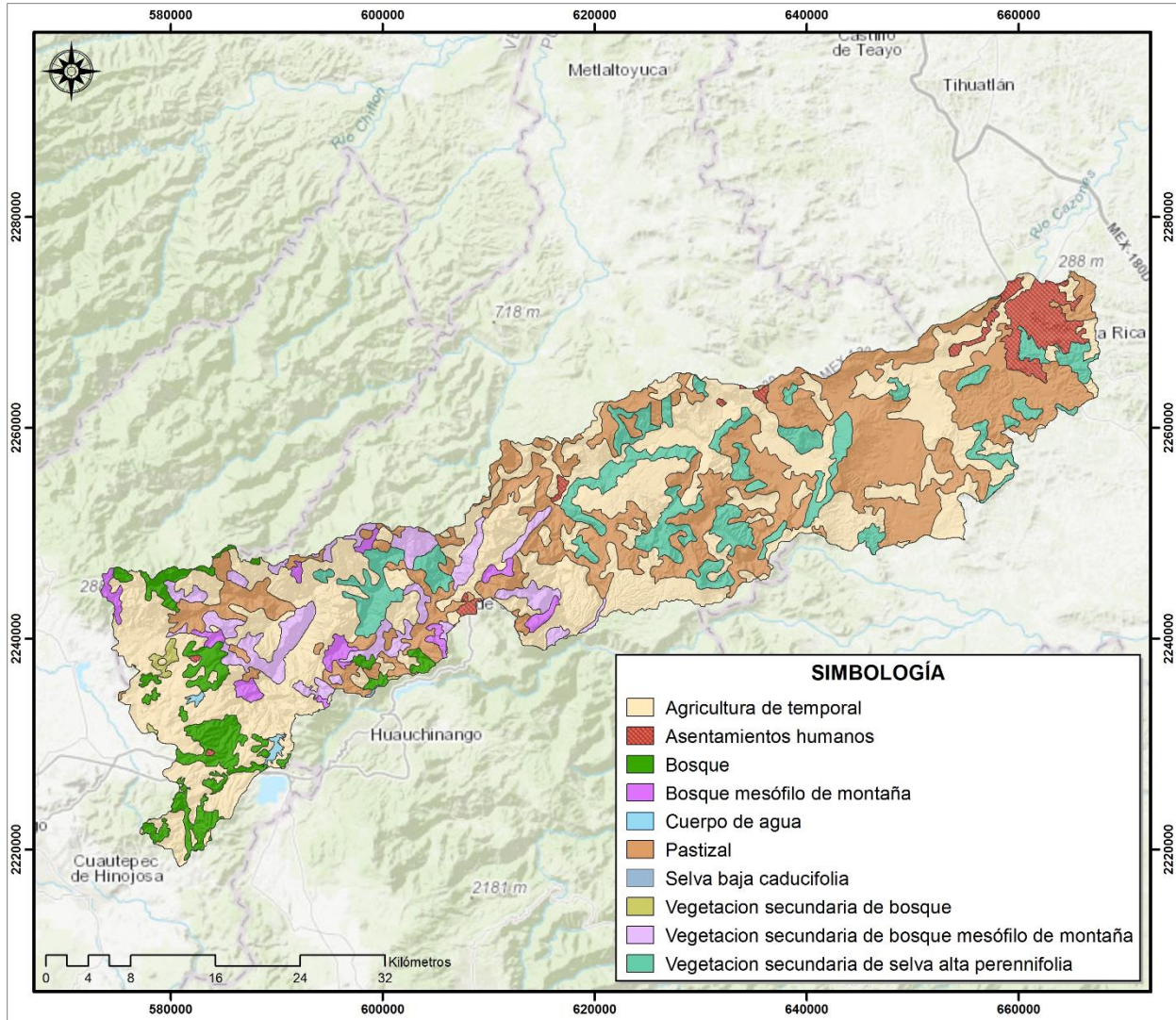


Figura 20. Uso del suelo de la cuenca San Marcos. (INEGI, 2016)

Los principales usos del suelo en la cuenca San Marcos con su respectiva superficie se presentan en el Cuadro 4; la última columna corresponde a los cinco municipios más representativos, con mayor superficie de dichos usos<sup>2</sup>.

Cuadro 4. Cobertura y uso del suelo de la cuenca San Marcos.

Uso del suelo	Superficie (ha)	Municipios
Agricultura de temporal	70,595.0	Xicotepc Acaxochitlán Coatzintla Zihuateutla Coyutla

<sup>2</sup> Usos con menos de 500 hectáreas no se incluyen en el cuadro.

**Cuadro 4. Continuación...**

Uso del suelo	Superficie (ha)	Municipios
Asentamientos humanos	5,287.2	Poza Rica Coatzintla Tihuatlán Xicotepec Venustiano Carranza
Bosque	7,669.8	Acaxochitlán Tenango de Doria Honey Huauchinango Juan Galindo
Bosque mesófilo de montaña	3,059.3	Xicotepec Acaxochitlán Tenango de Doria Huauchinango Naupan
Pastizal	49,080.9	Coatzintla Xicotepec Coyutla Venustiano Carranza Zihuateutla
Vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña	9,241.4	Xicotepec Pahuatlán Tlacuilotepec Huauchinango Honey
Vegetación secundaria de selva alta perennifolia	17,622.9	Xicotepec Coatzintla Coyutla Zihuateutla Jalpan



## 6.5. Clima

Tomando como referencia la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, se cuentan con siete unidades climáticas en la cuenca, pertenecientes a los Grupos A y C (Cuadro 5).

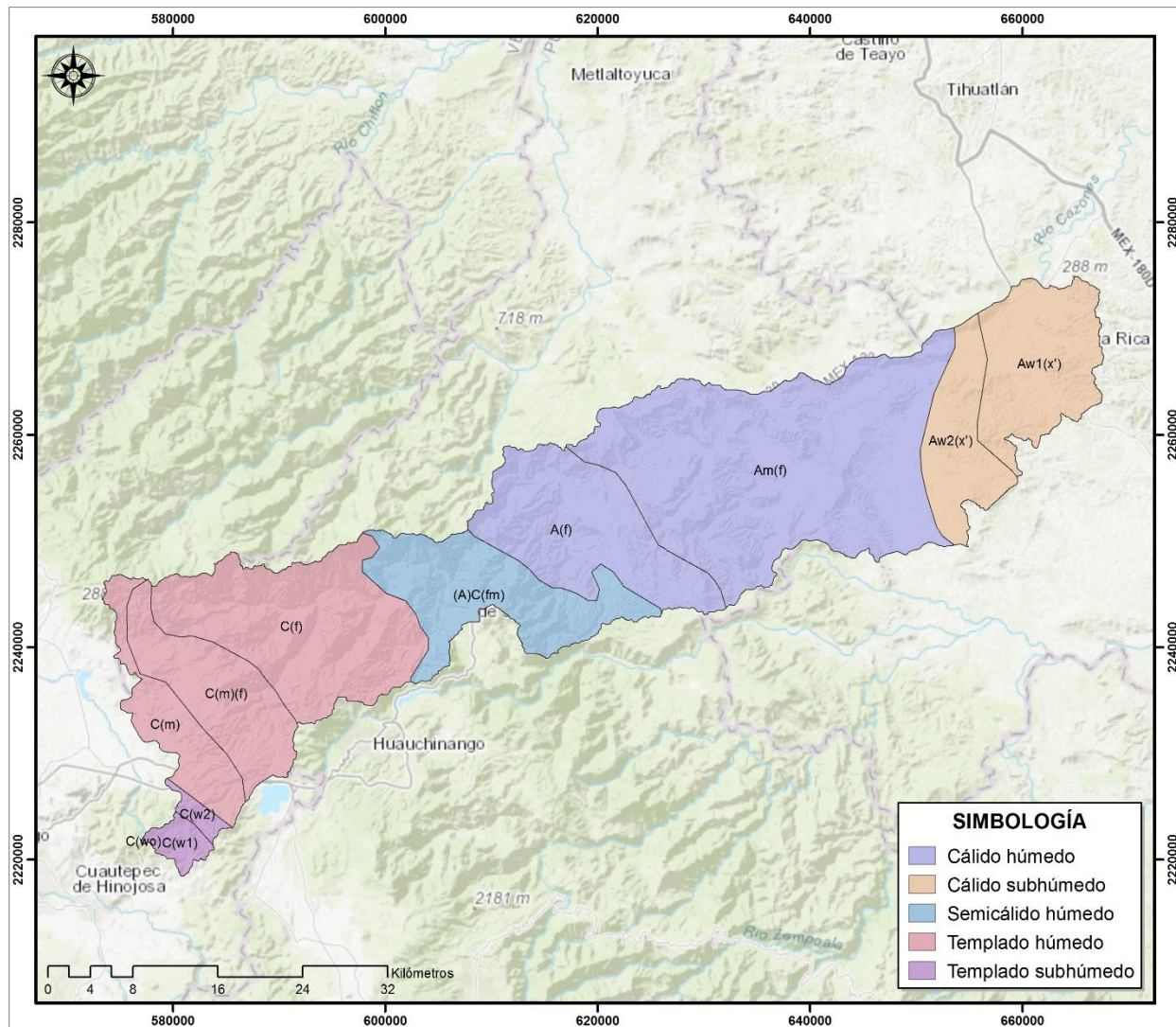
**Cuadro 5.** Descripción de unidades climáticas de la cuenca San Marcos.

Grupo Climático	Clave	Tipo	Precipitación
A	Am(f)	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	A(f)		Precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.
	Aw2(x')	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	Aw1(x')		Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	(A)C(fm)	Semicálido húmedo, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.
C	C(f)	Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente por debajo de 22°C.	Precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
	C(m)		Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	C(m)(f)		Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	C(w2)	Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente por debajo de 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
	C(wo)	Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente por debajo de 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

**Cuadro 5. Continuación...**

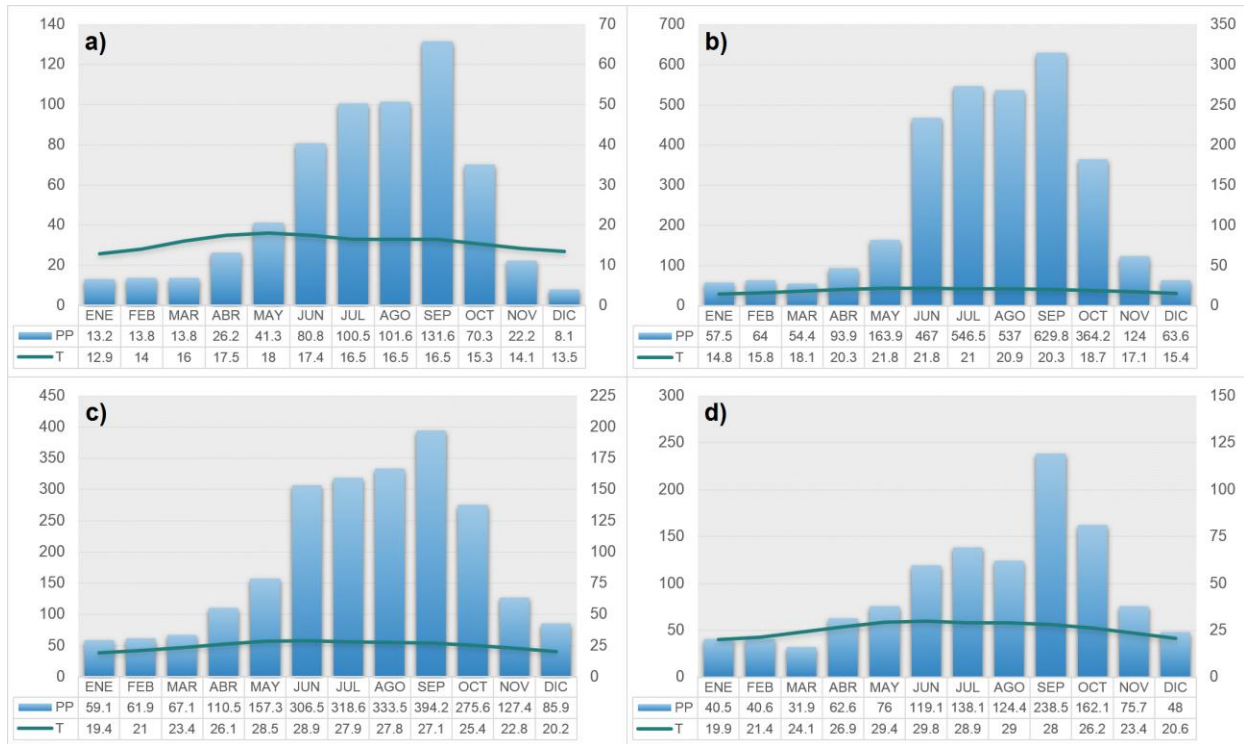
Grupo Climático	Clave	Tipo	Precipitación
C	C(w1)	Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente por debajo de 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

En lo que respecta al estado de Hidalgo, en la parte alta, predominan los climas templados húmedos y subhúmedos, mientras que en el estado de Puebla se presenta la zona de transición a los cálidos húmedos y subhúmedos que continúan hasta la parte baja de la cuenca en Veracruz (Figura 21).



**Figura 21.** Climas de la cuenca San Marcos. (INEGI, 2000)

La Figura 22 muestra los climogramas de las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca San Marcos; estos permiten dar una idea del cambio de las variables climáticas en distintos puntos de esta.



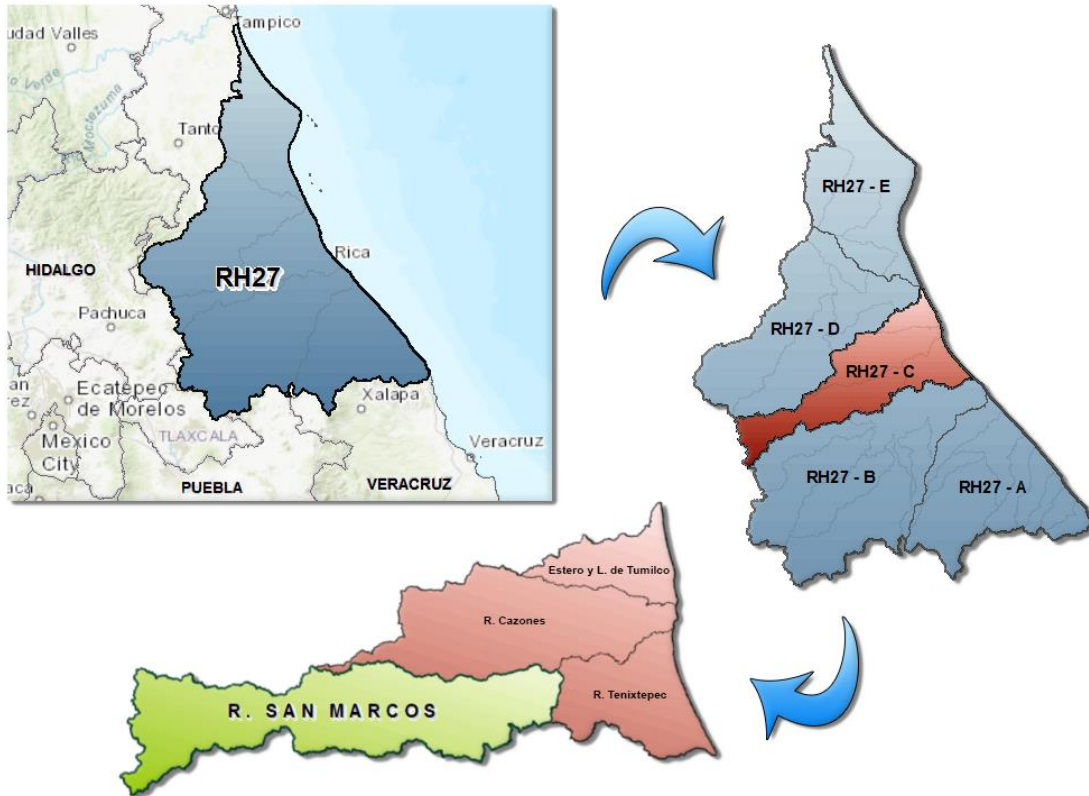
**Figura 22.** Climogramas de cuenca San Marcos. a) cuenca alta; b) cuenca media-alta; c) cuenca media-baja; d) cuenca baja

La cuenca alta se caracteriza por tener algunos periodos de sequía a principios de año, con precipitación media anual de 623 milímetros. En contraste, la cuenca media presenta una variación considerable al mostrar láminas de precipitación de 3,166 y 2,298 milímetros anuales. En la parte baja de la cuenca se puede observar una mayor fluctuación de temperatura que en las demás estaciones, este comportamiento se debe a la cercanía con el Golfo de México, la topografía, y los gradientes altitudinales que se identifican en la zona.

El área de estudio presenta una zona de transición, lo cual genera los altos escurrimientos reportados; a partir del análisis de la distribución temporal de la precipitación y la temperatura en los climogramas de la cuenca San Marcos es posible identificar los meses más cálidos, más lluviosos, la amplitud térmica, la temperatura y precipitación media, si existe sequía, y el tipo de clima.

## 6.6. Hidrología superficial

La cuenca San Marcos se encuentra localizada dentro de la Región Hidrológica No. 27, denominada Tuxpan-Nautla, específicamente comprende parte de la cuenca del río Cazones (RH27C). La Región Hidrológica No. 27 drena al Golfo de México, por tanto, se ubica en la porción este del país (Figura 23); las cuencas más importantes de esta región hidrológica son las de los ríos Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Nautla, Misantla y Colipa.

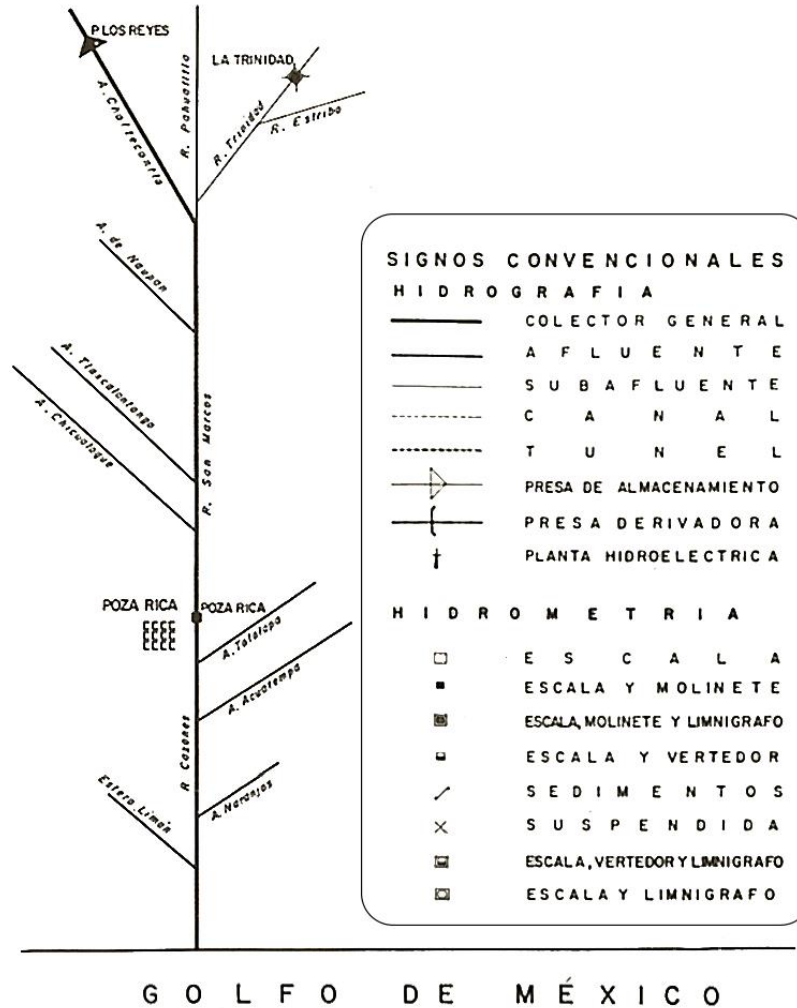


**Figura 23.** Región hidrológica de la cuenca San Marcos.

Los ríos que fluyen a través de la cuenca se originan en la sierra norte del estado de Puebla; en su mayoría lo recorren de suroeste a noreste, y desembocan en el río Cazones, que eventualmente descarga en el Golfo de México (Figura 24); se considera que esta región contiene grandes caudales hidrológicos.

Las corrientes principales que conforman la cuenca hidrológica San Marcos son: río Chaltecontla, río Pahuatitla, río Trinidad, río Estribo, arroyo Naupan, arroyo Tlaxcalantongo y arroyo Chicualoque, río San Marcos.





**Figura 24.** Flujos principales de la cuenca San Marcos. MODIFICADO DE SRH (1970).

A partir del boletín hidrológico de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1970) se presenta un breve resumen de las corrientes principales que se encuentran en la cuenca.

Los arroyos que forman la corriente principal del área de estudio descienden de la Sierra de Hidalgo; nacen en el parteaguas que limita el río Tulancingo, 10 km al este de la ciudad del mismo nombre y a una altitud de 2,750 m, dando lugar a la formación del río Chalcoyunga el que en sus orígenes se denomina río de Los Reyes. Su curso sigue un rumbo noreste y sus aguas se controlan en la presa Los Reyes a 2,165 m de altitud; con ellas se alimenta el vaso Necaxa, mediante un túnel que conduce las aguas de la presa al arroyo Tlalcoyunga y de este por un canal a la planta hidroeléctrica de Texcapa.



Aguas abajo de la presa Los Reyes, todavía en la zona abrupta de la sierra y a 1,000 m de altitud se le une al río Pahuatitla al que a su vez afluye por margen izquierda el río Trinidad controlado en la estación hidrométrica la Trinidad.

Desde la confluencia de los arroyos Chaltecontla y Pahuatitla la corriente recibe el nombre de San Marcos: su curso sigue un rumbo nororiente por zonas de topografía media en donde afluyen por la margen derecha los arroyos Naupan, Tlaxcalantongo y Chicualoque a elevaciones de 550, 150 y 80 m respectivamente hasta la zona de Poza Rica, Veracruz, donde se encuentra la estación hidrométrica del mismo nombre.

A partir de dicha estación, la corriente del río San Marcos fluye por la planicie costera con el nombre de río Cazones hasta desembocar en el Golfo de México; después de recibir por margen izquierda los arroyos Totolapa, Acuatempa y Naranjos y por margen derecha el estero Limón<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Las corrientes que se encuentran después de la estación hidrométrica de Poza Rica, no se consideran como parte de la cuenca estudiada.

## **7. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **7.1. Materiales**

En este apartado se detallan las fuentes de información consultadas durante la investigación y los materiales utilizados en la salida de campo.

#### **7.1.1. Información biofísica**

Con la finalidad de caracterizar la cuenca, se recopiló y analizó la siguiente información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

- Datos vectoriales del Continuo Nacional de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI, escala 1:250,000.
- Datos vectoriales del Continuo Nacional Edafológico escala 1:250,000.
- Datos vectoriales del Continuo Nacional Fisiográfico escala 1:1,000,000.
- Datos vectoriales del Continuo Nacional de Subprovincias Fisiográficas, escala 1:1,000,000.
- Datos vectoriales del Continuo Nacional de Topoformas escala 1:1,000,000.
- Datos vectoriales del Continuo Nacional Geológico escala 1:250,000.
- Datos vectoriales de la RH 27, Subregión 27C, Subcuenca RH27Cd, escala 1:50,000.
- Modelo de elevación digital con resolución de 15m.

#### **7.1.2. Información meteorológica**

- Estaciones Meteorológicas a cargo del SMN.
- Datos vectoriales de Unidades Climáticas de INEGI, escala 1:1,000,000.

#### **7.1.3. Información hidrométrica**

Para el análisis hidrométrico se consideraron estaciones de aforo localizadas en la zona de influencia de la cuenca San Marcos, para ello se consultaron:

- Boletines hidrológicos.
- Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS).

#### **7.1.4. Instrumental para salida de campo**

- Marco graduado de 40 x 40 centímetros
- GPS 60csx Garmin®
- Libreta de campo
- Cinta métrica 30 M Truper®

#### **7.1.5. Hardware y Software**

Se utilizó una computadora personal con las siguientes características técnicas:

- Marca: Dell Inspiron 15 7000 Series 7548
- Sistema operativo: Windows 8.1 Pro de 64 bits
- Procesador: Intel® Core™ i7 CPU 2.60 GHz
- Memoria instalada (RAM): 8.00 GB
- Capacidad de Disco Duro: 500 GB
- Velocidad de red: 100.0 Mbps
- Resolución de pantalla: 1920 x 1080

Los programas computacionales utilizados fueron:

- ArcGis® 10.4
- Google Earth Pro®
- Microsoft Office 2013® (Word, Excel y PowerPoint)
- Aplicación web Jupyter®



## **7.2. Metodología**

### **7.2.1. Preprocesamiento de información**

Cada modelo hidrológico requiere de insumos diferentes para su operación por el usuario; el modelo REW no está integrado en una interfaz como ArcMap u otras que facilitan su utilización. Se cuenta con una carpeta principal, seguida de subcarpetas que permiten correr el modelo desde la línea de comando, además, la información debe concentrarse en formatos específicos y organizarse de una manera determinada; el procedimiento utilizado para lograr lo anterior, se describe a continuación.

#### **7.2.1.1. Preparación de datos meteorológicos**

Teniendo en cuenta que las estaciones meteorológicas dentro del área de influencia de la cuenca son bastantes y pudiesen no ser útiles para la modelación, se puede optimizar el procesamiento de gran cantidad de datos mediante un algoritmo escrito en lenguaje de programación Python. La elaboración de estadísticas comparativas y discriminación de datos no útiles, permitieron recorrer de manera eficiente la información y que al final obtener resultados fáciles de interpretar por el usuario, coadyuvando a la toma de decisiones.

Como parte del pre-procesamiento de información, se extrajeron los datos meteorológicos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), (2010) (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, evaporación potencial) y se elaboró y ejecutó un script para visualizar la disponibilidad de datos de la serie continua. La información proporcionada se encuentra en un formato común, modificable fácilmente por cualquier editor de texto. Cabe señalar, que el hecho de que las series de datos cuenten con esta estructura, facilita la programación con el lenguaje Python para obtener una vista preliminar de los datos, tal como se puede observar en la Figura 25.

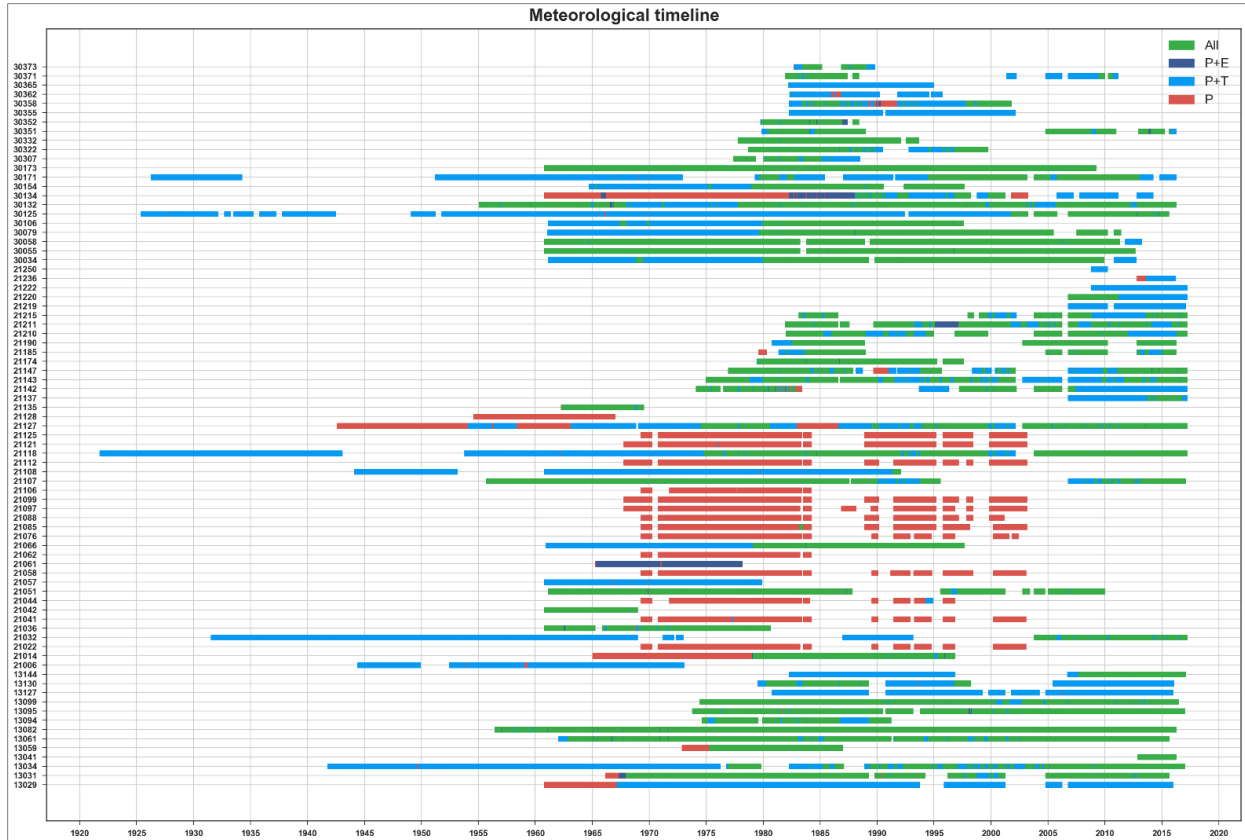


Figura 25. Disponibilidad de datos meteorológicos.

En total se consideraron 79 estaciones dentro del área de influencia de la cuenca San Marcos, distribuidas en tres estados (Hidalgo, Puebla y Veracruz), sin embargo, no todas las estaciones del SMN disponen de datos o están incompletos dado que dejaron de operar hace varias décadas. Al programar se permitió una visualización eficiente para poder seleccionar las estaciones con datos más completos, que fuesen convenientes de utilizar como insumos para el modelo REW, a fin de realizar una simulación adecuada y más precisa del mismo.

De igual manera, el modelo requiere que los datos sean de un periodo continuo, por lo que las primeras décadas de 1900, no resultaron de utilidad. En vista de lo anterior, se decidió acotar la selección de datos desde 1980 hasta los más actuales, con ello se pudo observar una mejor distribución de estos, más localizada y se comenzaron a descartar las estaciones que no eran de interés (Figura 26). Algunos de los criterios para excluir, fueron las series que no contaban con todas las variables (línea roja, azul y morada) y en cuales la información fuera discontinua por varios años.

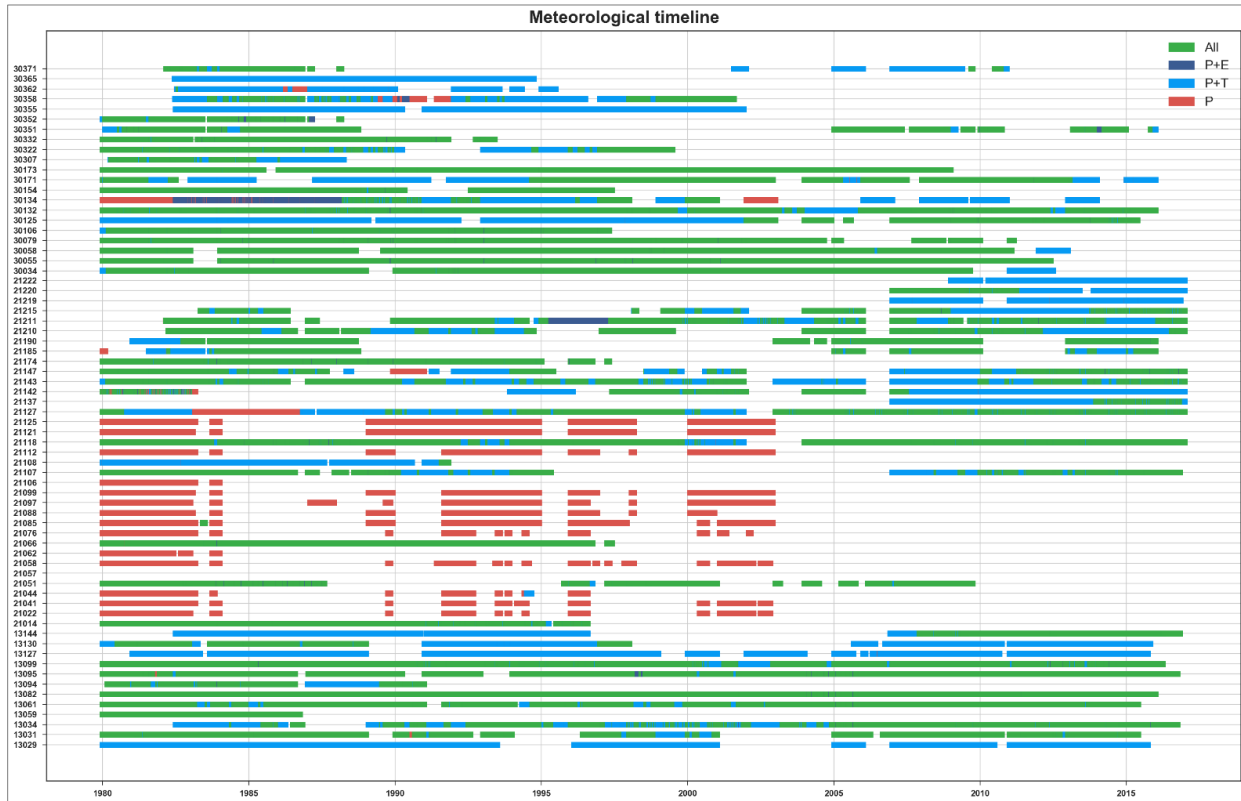


Figura 26. Disponibilidad de datos a partir de 1980.

En las Figuras 25 y 26, es de interés identificar las líneas de color verde, que sean continuas, ya que, idealmente, estos son los conjuntos de datos con la información meteorológica más completa en la serie temporal. Al analizar el acumulado de estaciones y suprimir las que no cumplieran con los requerimientos de información del modelo, se seleccionó un total de 12 estaciones (13061, 13082, 13095, 13099, 21118, 21127, 21211, 30034, 30055, 30058, 30132 y 30173)<sup>4</sup>.

De acuerdo con lo que plantea Carretero (2011), se deriva que a pesar de que las estaciones seleccionadas, cuentan con un nivel adecuado de información, es necesario realizar un análisis de consistencia de datos, para determinar con cierto grado de confiabilidad, si es pertinente utilizarlos. Para cumplir este supuesto, se realizó un análisis de doble masa con la finalidad de obtener la correlación entre las estaciones elegidas (Figura 27).

<sup>4</sup> Las estaciones con el prefijo 13, 21, y 30 pertenecen a los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz, respectivamente.

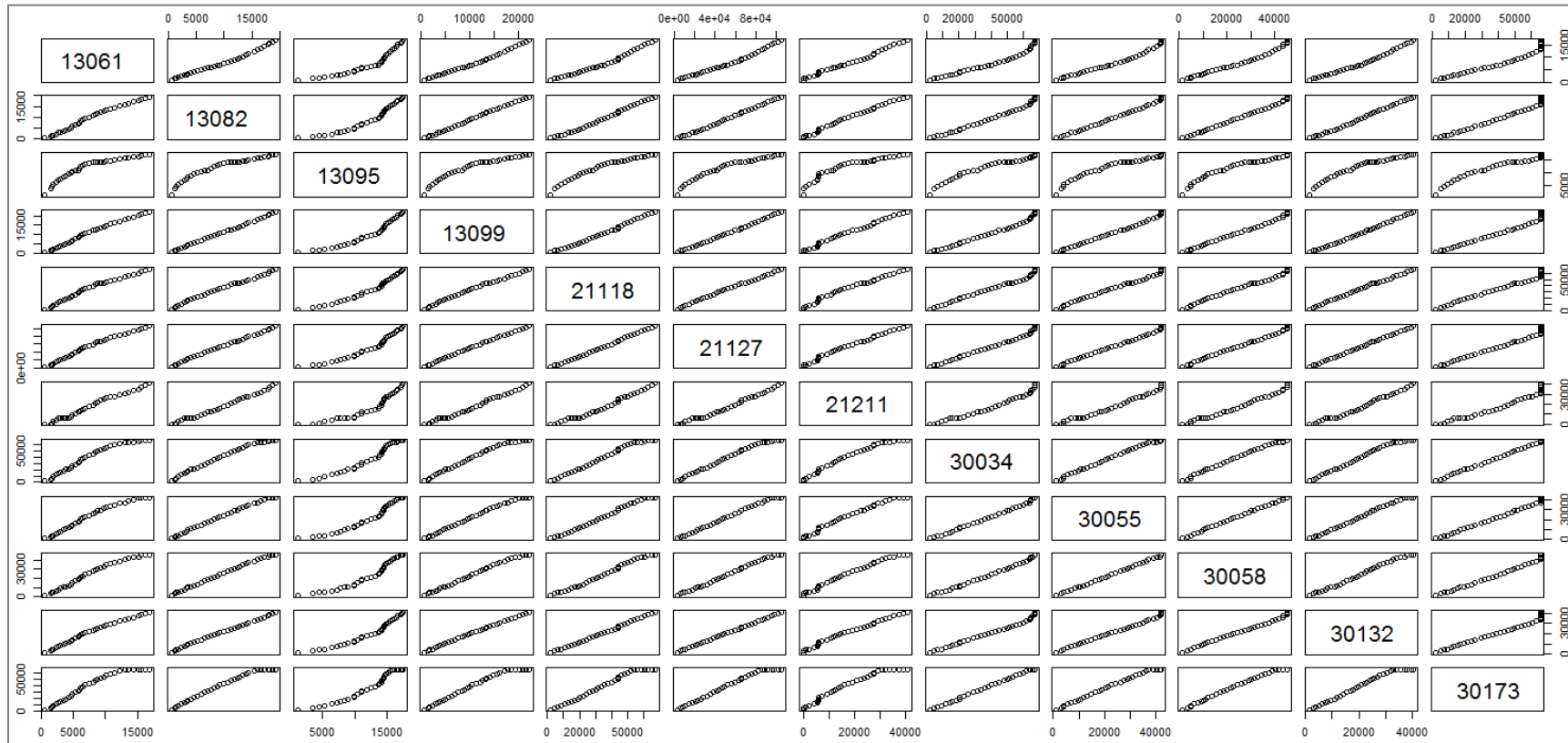
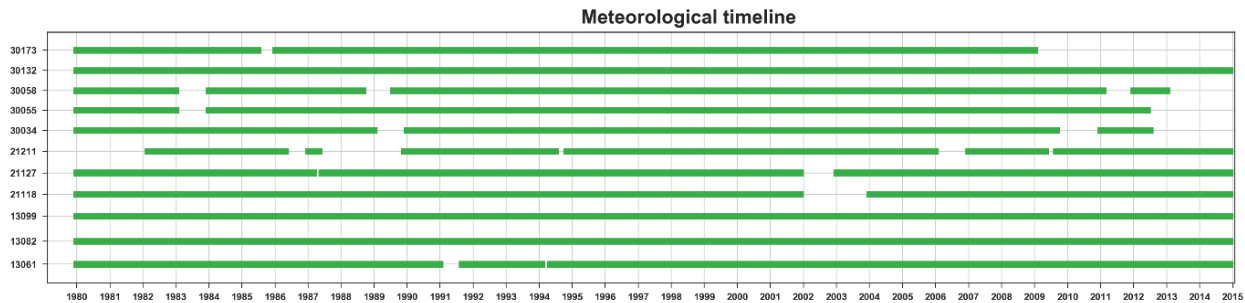


Figura 27. Análisis de doble masa para las estaciones seleccionadas.

Como se puede observar en la Figura 27, la mayoría de las gráficas en filas y columnas presentan una línea diagonal casi recta, esto significa una correlación adecuada, por ende, se pueden utilizar los datos con un nivel de confiabilidad aceptable. No obstante, se manifiesta una excepción en este comportamiento, el de la estación 13095. Tanto el análisis de doble masa hecho para esta estación como la correlación con otras, resulta en valores no aptos para tomarla en cuenta; visualmente, en la tercera columna, así como en la tercera fila, se concluyó que existe inconsistencia en los datos de esta estación, por lo que se excluyó de la selección final.

### 7.2.1.2. Análisis e imputación de datos

La Figura 28 presenta la disponibilidad de datos en un periodo de treinta y cuatro años, para las once estaciones remanentes, sin embargo, la información registrada no se tiene de forma continua debido a falta de personal para las mediciones y falta de mantenimiento, entre otros factores (Suárez *et al.*, 2015).



**Figura 28.** Línea de tiempo de estaciones seleccionadas.

Algunos autores como Campozano *et al.* (2015), enfatizan la importancia de contar con series continuas de información meteorológica, ya que, entre otras cosas, permiten mejorar considerablemente los procesos de calibración y validación de modelos hidrológicos y climáticos.

Con el objetivo de tener una serie temporal con estas características, se utilizaron dos métodos para la imputación de datos: el método de la razón normal y la Interpolación IDW (ponderada por el inverso de la distancia). El primer método fue propuesto por Paulhus y Kohler en 1952; a través de los años ha sido utilizado en numerosos estudios para completar los datos faltantes, conjuntamente con el segundo (Hydrology Project Technical Assistance, 1999; Teegavarapu y Chandramouli, 2005; De Silva *et al.*, 2007; Campozano *et al.*, 2015; Reinoso, 2016; Caldera *et al.* 2016).

Por medio de los métodos anteriores se efectuó el relleno de la serie de datos de las variables meteorológicas de interés: precipitación, evaporación potencial y temperatura, para las 11 estaciones seleccionadas. Con ello se obtuvo una serie con 34 años de información continua; la distribución de esta información de manera subsecuente, es indispensable para operar el modelo y definir los centroides en las unidades REW generadas para la cuenca San Marcos.

### 7.2.1.3. Asignación de uso de suelo

Se utilizó la capa vectorial de uso del suelo y vegetación con escala 1:250,000 de INEGI (2016), para obtener las coberturas presentes en la cuenca. Posteriormente se realizó una reclasificación para reducir dichas coberturas en clases principales y como último paso se les asignaron coeficientes de cultivo (Kc) de acuerdo con el manual de FAO (Allen *et al.*, 1998) (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Clases de uso asignadas para la cuenca San Marcos.

Clase	Descripción	Rango de Kc
1	Agricultura	0.35 - 1.2
2	Asentamientos Humanos	0.90 - 1.0
3	Bosque de Pino	0.95 - 1.5
4	Bosque Mesófilo de Montaña	0.95 - 1.5
5	Cuerpo De Agua	0.95 - 1.0
6	Pastizal	0.30 - 0.80
7	Selva Baja Caducifolia	0.75 - 1.2
8	Vegetación Secundaria Arbustiva	0.50 - 0.95
9	Vegetación Secundaria Herbácea	0.40 - 0.85
10	Zona Urbana	0.90 - 1.0

Para introducir esta información al modelo, se transformó la capa reclasificada de uso del suelo en formato raster a vectorial y se le adicionó un campo de Kc con los valores correspondientes. A continuación, con una de las herramientas proporcionadas para complementar la información del modelo (*Esri2TIFF.exe*) se realizó un recorte de la capa de uso del suelo utilizando como máscara el límite de la cuenca. Al terminar este proceso, se reserva el producto para utilizarse posteriormente dentro de la carpeta TAUDEM; el análisis REW/REC se encargará de la asignación del uso del suelo y sus coeficientes.



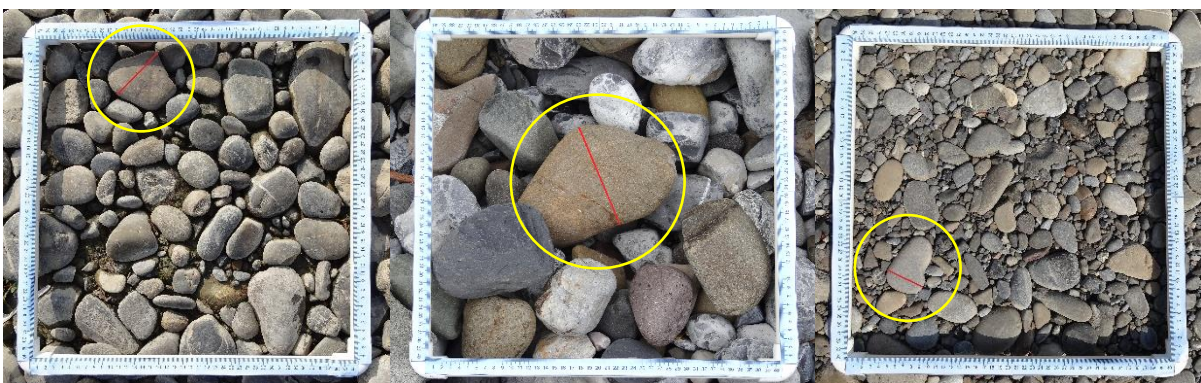
#### 7.2.1.4. Valores de los coeficientes de rugosidad

Existe variación en el tamaño de sedimentos presentes en la cuenca, por ello, además de la información meteorológica y de uso del suelo, el modelo REW requiere de valores de coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) a lo largo del cauce principal. Dichos valores fueron obtenidos en campo, y procesados en gabinete, tomando como referencia y siguiendo las pautas de metodología propuesta por Arcement y Schneider (1989).

En primera instancia, con software de sistemas de información geográfica, se definieron cuatro rangos de pendiente a lo largo del cauce principal, con la finalidad de designar los sitios de muestreo que fuesen representativos y en donde se permitiera el acceso para el registro de datos.

Localizados los sitios de muestreo con GPS, se procedió con el registro de datos al margen del cauce. Se colocó un marco graduado de 40 x 40 centímetros sobre un área que fuese distintiva del tamaño de sedimentos en el sitio y posteriormente, se comenzó a realizar la correspondencia fotográfica; se siguieron estos mismos pasos para cada sitio, por rango de pendiente.

Concluidos los muestreos, se descargó la información y se procesó con el apoyo de un software de sistemas de información geográfica. Se referenciaron todas las fotografías colectadas por sitio de muestreo con respecto al marco graduado, para poder realizar mediciones sobre ellas y que su escala fuese correcta. Subsecuentemente, se calcularon los anchos de los sedimentos y se obtuvo un valor promedio por sitio, para determinar el coeficiente de rugosidad correspondiente, de acuerdo con la escala referida (Figura 29).



**Figura 29.** Estimación de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes sitios de muestreo.

## **7.2.2. Aplicación del modelo termodinámico REW**

El modelo REW no está integrado en una interfaz de sistemas de información geográfica, que facilite su utilización; se ejecuta desde línea de comando y su estructura se desarrolla desde una carpeta principal, seguida de subcarpetas. Los insumos que requiere el modelo deben agruparse y estructurarse en formatos específicos, para lograr esto, se cumplió con el siguiente proceso.

### **7.2.2.1. Creación de los directorios de trabajo**

Para poder ejecutar el modelo, se necesitan establecer los directorios de trabajo. Se comienza por configurar los ejecutables que instalan el modelo y posteriormente se crea un directorio para el proyecto de la cuenca específica que se va a modelar; para lo anterior se requieren las siguientes condiciones<sup>5</sup>.

- Crear un directorio C:\exec en la unidad C:, se puede realizar la instalación en cualquier otra unidad.
- Crear el directorio raíz del proyecto C:\datos\poza.
- Crear los subdirectorios:  
C:\datos\poza\ascii, C:\datos\poza\logs, C:\datos\poza\matlab,  
C:\datos\poza\results, C:\datos\poza\stations, C:\datos\poza\taudem.
- Agregar la ruta C:\exec a las rutas del sistema accediendo a la configuración de Windows en Panel de Control\Sistema\Configuración avanzada del sistema\Variables de entorno.

### **7.2.2.2. Instalación de los ejecutables y archivos del proyecto**

El modelo REW proporcionado por su desarrollador, consta de dos carpetas: Exec, que contiene los archivos ejecutables y librerías de Matlab y la carpeta Taudem, que incluye las herramientas que permiten la optimización general del modelo de elevación digital, la extracción de las características de la red de flujo y la obtención de las unidades REW.

---

<sup>5</sup> Se utilizó el nombre “poza” para la cuenca San Marcos en este trabajo; para realizar la modelación en otra cuenca el usuario debe modificar los directorios a su conveniencia.



Como paso sucesivo, se procede a copiar los archivos de las carpetas antes mencionadas a los directorios en la unidad C: con el mismo nombre, creados en el apartado anterior.

### 7.2.2.3. Ejecución del paquete TAUDEM

Como se ha mencionado anteriormente, el paquete TAUDEM se encarga del pre-procesamiento del modelo de elevación digital, y para ello, se requiere que se añada dicho archivo a la carpeta con el mismo nombre. Así como el archivo puntual de la estación hidrométrica de la cuenca, que se encuentre sobre el cauce principal; se recomienda que los nombres de dichos archivos sean los mismos que del proyecto.

Una vez que se agregan dichos archivos se procede a ejecutar el archivo *prepare.bat*<sup>6</sup> desde línea de comando; lo anterior permite el procesamiento en cadena de las herramientas del paquete y la generación de unidades REW.

### 7.2.2.4. Definición y uso de centroides

Derivado del proceso anterior, se obtiene un archivo en formato raster de las unidades REW generadas por el módulo TAUDEM; se procede a transformar dicha capa a formato vectorial y extraer los centroides de los polígonos con alguna de las herramientas de las que dispone un software de sistemas de información geográfica.

Posteriormente, con la serie temporal de datos que se obtuvo como resultado del punto 2.1.2, se utilizó un método de interpolación con la finalidad de asignarle un valor, proveniente de las variables meteorológicas, a los centroides correspondientes a cada unidad REW. Para cada variable, se deben tener como resultado archivos de texto con el formato presentado en la Figura 30; una fila de encabezado con la fecha y el número de centroides presentes en la cuenca y las columnas ocupadas con los datos respectivos a la variable de interés.

---

<sup>6</sup> El número de REWs generadas depende del orden Stralher que se elija para las corrientes, por lo que se debe modificar el valor en *thresh* de este archivo para dicho propósito.



```
In [9]: try: ncfile.close()
except: pass
ncfile = netCDF4.Dataset("/Users/Ileana Aldrete/Desktop/pozatimeseries.nc", mode="w")
#format="NETCDF4_CLASSIC"
print (ncfile)

<type 'netCDF4._netCDF4.Dataset'>
root group (NETCDF4 data model, file format HDF5):
  dimensions(sizes):
  variables(dimensions):
  groups:

In [10]: #Creating dimensions
stations_dim = ncfile.createDimension('stations',25)
time_dim = ncfile.createDimension('time', len(dates_list))
time = ncfile.createVariable('time', np.int32, 'time')
time.units = "minutes since 1970-01-01"
units = time.units
time.long_name = 'time'
time[:] = netCDF4.date2num(dates_list, units = units, calendar='gregorian')
char_len_id = ncfile.createDimension('char_len_id',255)
char_len_name = ncfile.createDimension('char_len_name',255)
# for dim in ncfile.dimensions.items():
#     print(dim)

In [11]: #Creating Variables
lat = ncfile.createVariable ('lat',np.float64,('stations'))
lat.standard_name = 'latitude'
lat.long_name = 'station coordinates, latitude'
lat.units = 'degrees_north'

lon = ncfile.createVariable ('lon',np.float64,('stations'))
lon.standard_name = 'longitude'
lon.long_name = 'station coordinates, longitude'
lon.units = 'degrees_east'

In [15]: print(ncfile)
ncfile.close()

<type 'netCDF4._netCDF4.Dataset'>
root group (NETCDF4 data model, file format HDF5):
  dimensions(sizes): stations(25), time(12784), char_len_id(255), char_len_name(255)
  variables(dimensions): int32 time(time), float64 lat(stations), float64 lon(stations), float64 y(stations), float64 x(stations), |S1 station_id(stations,char_len_id), |S1 station_names(stations,char_len_name), float64 rainfall_depth(time,stations), float64 potential_evaporation(time,stations), float64 air_temperature(time,stations), float64 relative_humidity(time,station s), float64 air_temperature_diurnal_cycle(time,stations)
  groups:
```

Figura 31. Script para crear archivo NetCDF.

### 7.2.2.6. Ejecución del análisis REW/REC

Posterior a que se obtuvieron los resultados del módulo TAUDEM, los archivos para ejecutar el análisis REW/REC quedaron disponibles. Dentro de la carpeta `c:/taudem`, se ejecuta desde línea de comando la instrucción `rewanalysis poza`, con objeto de concretar el primer análisis que establece la inter-conectividad entre unidades REW y calcula sus áreas; finalizado el proceso anterior, se procedió a ejecutar de manera similar, la instrucción `recanalysis poza` que cumple con la subdivisión de la zona insaturada en columnas y les asigna la información complementaria (uso de suelo, infraestructura, etc.). Después de ejecutar `rewanalysis.exe` y `recanalysis.exe`, es necesario copiar los archivos con terminación `rew.mat`, `rec.mat` y `links.mat` manualmente a la carpeta Matlab ya que se requieren como insumos para el módulo Preprocessor.

### 7.2.2.7. Ejecución del paquete Preprocessor

Para ejecutar el paquete o módulo Preprocessor, se volvió al directorio raíz del proyecto y se escribió desde línea de comando la instrucción *preprocessor –addParams poza*, en este paso se asignaron los parámetros de rugosidad e hidráulicos para los cálculos computacionales y se interpretaron los datos de la serie temporal en formato NetCDF. Seguidamente, en la carpeta Ascii, se buscó el archivo *poza.bc* y en la sexta columna, primera fila se cambió el primer valor de 1 a 2, en seguida se guardó y se cerró el archivo.

### 7.2.2.8. Ejecución del paquete Solver

Como último paso para la simulación, se ejecutó la instrucción *solver poza* desde línea de comando, en el directorio raíz del proyecto (Figura 32), cabe señalar que dependiendo del número de años que se pretenda simular, el proceso dura aproximadamente un minuto por año. Terminada la primera simulación, se ejecutó nuevamente la misma instrucción para dar lugar a una segunda simulación, esto se realizó de manera similar a utilizar un año de entrenamiento, como lo utilizan otros modelos. Concluido el proceso anterior, en la carpeta Results, se pudieron visualizar los archivos con los resultados de la simulación en formato “.out”, estos se pueden abrir con cualquier editor de texto; el último archivo, de acuerdo a las unidades REW generadas es el que contiene toda la información referente al punto de salida de la cuenca.

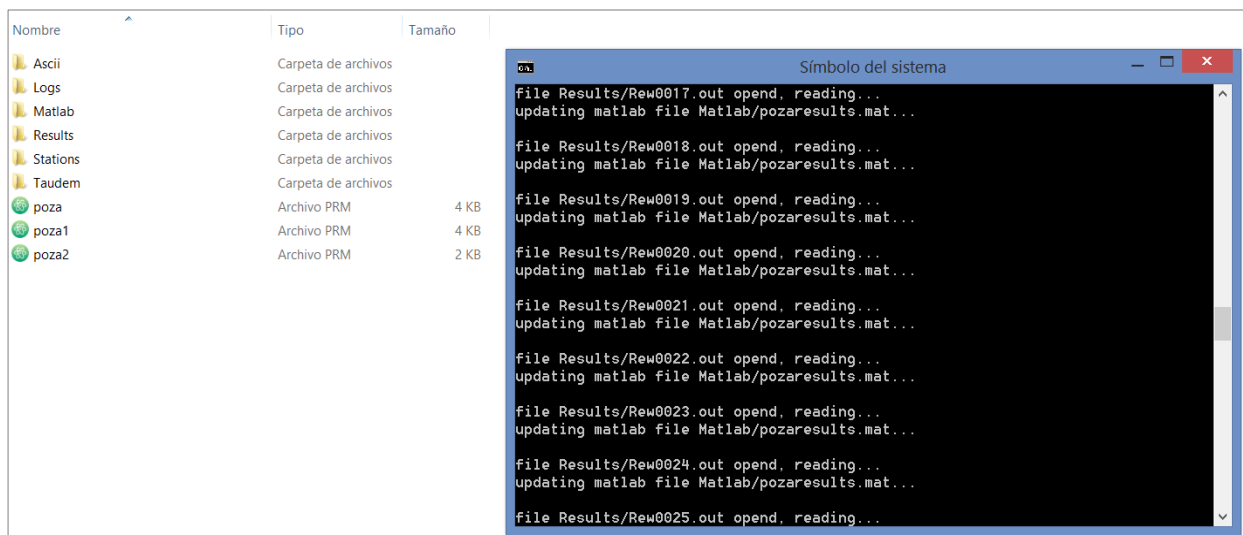


Figura 32. Ejecución del módulo Solver.

**Nota:** Como ejemplos de los resultados que se visualizan en un archivo “.out”, consultar A1 y A2 en Anexos.

### 7.2.3. Calibración del modelo

La calibración del modelo REW consistió en ajustar los valores simulados por el modelo y los medidos en la estación hidrométrica de Poza Rica (27002), BANDAS-CONAGUA (2008) para el periodo de 1980-1998 con el método de prueba y error, realizando variaciones en los parámetros más sensibles hasta obtener los valores más altos del índice de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) definidos por las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$o_i$ : Valores observados

$\bar{o}$  : Media de los valores observados

$m_i$ : Valores calculados por el modelo

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})(y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}} \right)^2 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$y_i^{obs}$ : Valor observado

$y_i^{sim}$ : Valor simulado

$\bar{y}^{obs}$ : Valor medio observado

$\bar{y}^{sim}$ : Valor medio simulado

$n$ : Número total de observaciones

### 7.2.4. Validación del modelo

La validación del modelo REW se realizó con la finalidad de evaluar la eficiencia de los parámetros calibrados para estimar los escurrimientos, esto se realizó ejecutando la simulación del modelo para el periodo comprendido entre 2000-2014, con los parámetros ajustados en el paso anterior, obteniendo así, los escurrimientos estimados, así como los valores de índices de eficiencia del modelo (NSE y  $r^2$ ).



## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Definición de unidades REW

El modelo hidrológico utilizado, divide la cuenca en unidades REW de acuerdo al valor asignado para extraer corrientes con el orden Strahler, esto se efectúa a partir del modelo de elevación digital y la ejecución del módulo TAUDM. Una vez concluido dicho proceso, el modelo es capaz de simular diferentes variables hidrológicas para cada unidad REW.

La delimitación ejecutada por el modelo, tomando el segundo orden como valor de umbral para el orden de corrientes, da como resultado un área de 1,635.23 km<sup>2</sup> de la cuenca hasta la estación hidrométrica de Poza Rica (27002), y la dividió en 25 elementos REW de diferentes tamaños (Figura 33).

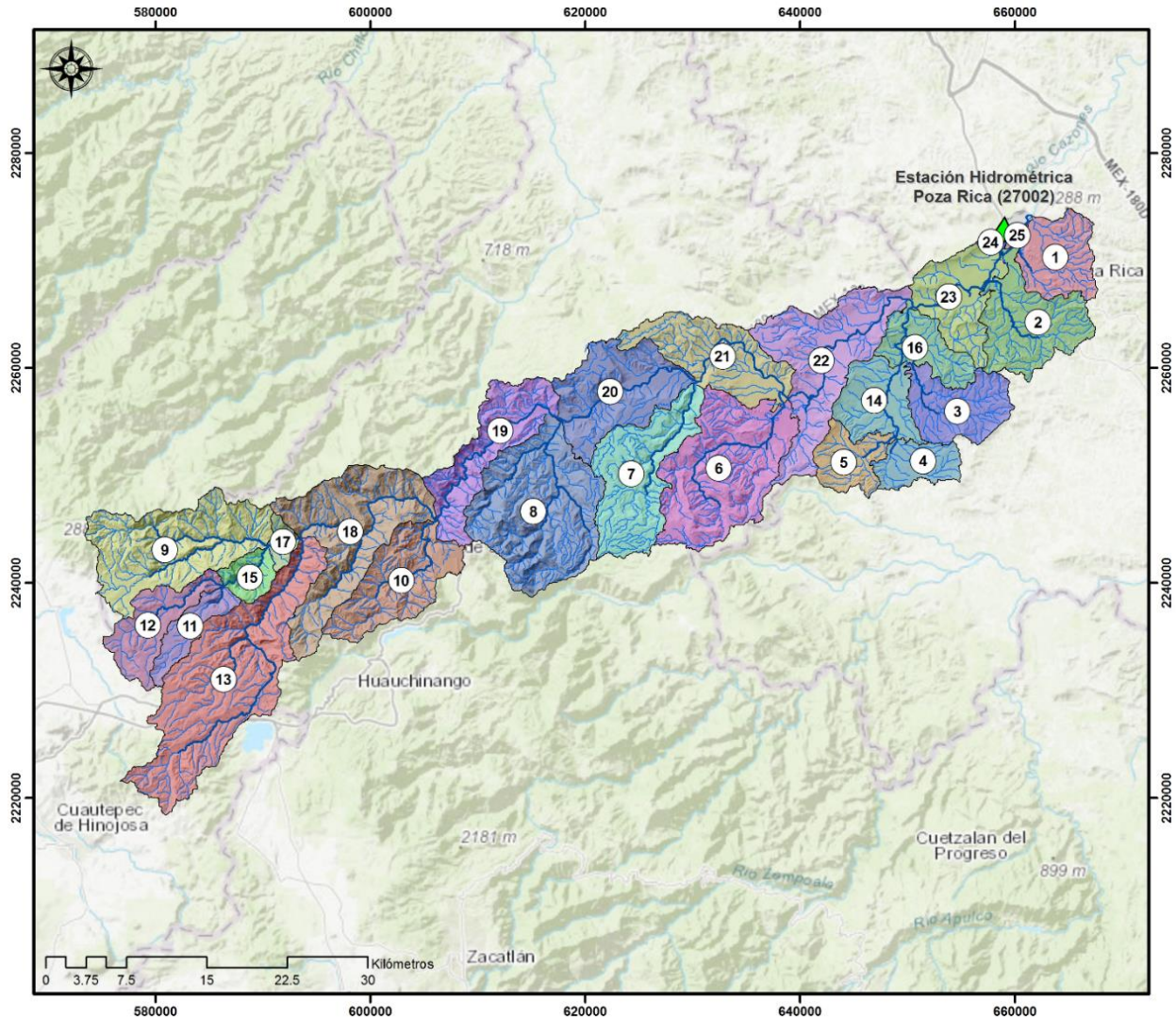


Figura 33. Unidades REW generadas por el módulo TAUDM.

## 8.2. Parámetros morfométricos de la cuenca

La cuenca San Marcos tiene una extensión de 1,635 km<sup>2</sup>, lo cual la cataloga como una cuenca grande de acuerdo con la clasificación propuesta por Chow (1962). La morfometría de la cuenca (Cuadro 7) gobierna principalmente la magnitud y la velocidad con la cual el agua de escurrimiento llega al cauce principal y se mueve desde la parte alta a la salida de la cuenca; esto tiene un efecto importante en el potencial hidráulico, el perfil y dimensiones de la sección transversal del cauce principal (Campos, 2007).

**Cuadro 7.** Morfometría de la cuenca San Marcos.

Tipo	Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
Parámetros de forma	$A$	Área de la cuenca	1,635.23	km <sup>2</sup>
	$P$	Perímetro	318.95	km
	$k_c$	Coefficiente de compacidad	2.21	Adimensional
	$R_f$	Índice de forma	0.07	Adimensional
	$R_c$	Relación de circularidad	0.20	Adimensional
Parámetros fisiográficos y de relieve	$R_e$	Relación de elongación	0.29	Adimensional
	$S_c$	Pendiente del cauce principal	1.49	%
Parámetros de drenaje	$S_{cuenca}$	Pendiente media de la cuenca	26.64	%
	$D_c$	Densidad de corrientes	5.84	cauces·km <sup>2</sup>
	$D_d$	Densidad de drenaje	1.42	km·km <sup>2</sup>
	$L_c$	Longitud total de corrientes	2,314.65	km
	$N_c$	No. total de corrientes	9549	Adimensional
	$L_c$ (Strahler)	Orden de corrientes	6	Adimensional
	$R_b$	Relación de bifurcación	1.74	Adimensional

Pissarra *et al.* (2004) señalan que las características morfométricas de la red de drenaje y del relieve reflejan algunas propiedades del terreno, como infiltración y escurrimiento de las aguas de lluvia, y expresan estrecha correlación con la litología, estructura geológica y formación superficial de los elementos que componen la superficie terrestre.



### 8.3. Calibración y validación del modelo

#### 8.3.1. Calibración de escurrimientos a nivel diario

La calibración manual de parámetros del modelo (coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ), exponente de la ley de transmisividad ( $\tau$ ), profundidad de la capa de flujo subsuperficial saturado ( $z$ ), exponente para partición de precipitación superficial ( $\varphi$ )) permitió estimar los escurrimientos diarios para compararlos con los observados en el periodo 1980-1998. Los valores utilizados, sus rangos y el ajuste de los indicadores de eficiencia, se muestran en el Cuadro 8.

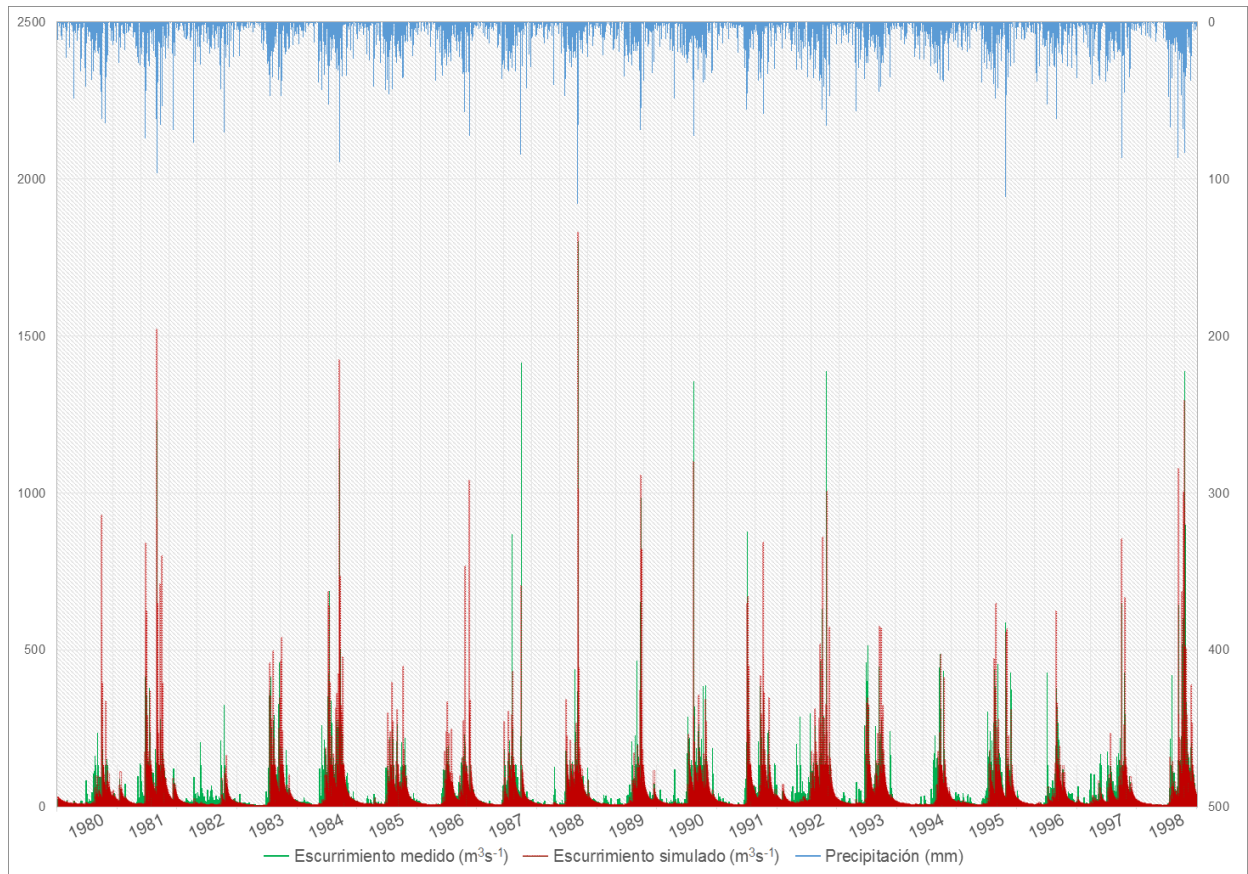
**Cuadro 8.** Parámetros utilizados para la calibración del modelo REW.

Parámetro	Descripción	Rango	Valor	Ajuste
$n$	Coeficiente de rugosidad de Manning ( $s/m^{1/3}$ )	0.02 - 0.04	0.028	$NSE_d=0.67$
$\tau$	Exponente de la ley de transmisividad (-)	2.0 - 4.0	2.0	$NSE_m=0.87$
$z$	Profundidad de la capa de flujo subsuperficial saturada (m)	0.3 - 1.5	0.45	$r^2_d=0.72$
$\varphi$	Exponente para partición de precipitación superficial (-)	0.2 - 0.5	0.40	$r^2_m=0.90$

Los parámetros más sensibles en el proceso de calibración fueron el coeficiente de rugosidad, la profundidad de la capa de flujo subsuperficial saturado y el exponente para partición de precipitación, lo cual coincide con otros estudios (Reggiani y Rientjes, 2005; Zhang y Savenije, 2005; Lee *et al.*, 2007; Mou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2012; Tian *et al.*, 2012; He *et al.*, 2015).

Con los parámetros calibrados, se estimaron los escurrimientos a nivel diario y los estimadores de eficiencia presentan valores de  $NSE=0.67$  y  $r^2=0.72$ . El índice de Nash-Sutcliffe, muestra un ajuste muy bueno de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007) y el valor del coeficiente de determinación permite deducir que el 28% de los datos no representan el ajuste del modelo a la variable que pretende explicar.

La comparación de los escurrimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel diario muestran una subestimación de los escurrimientos máximos, lo cual se asocia con las precipitaciones máximas que se presentan en los días lluviosos de los años evaluados (temporada de huracanes) (Figura 34).



**Figura 34.** Escurrimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel diario (calibración).

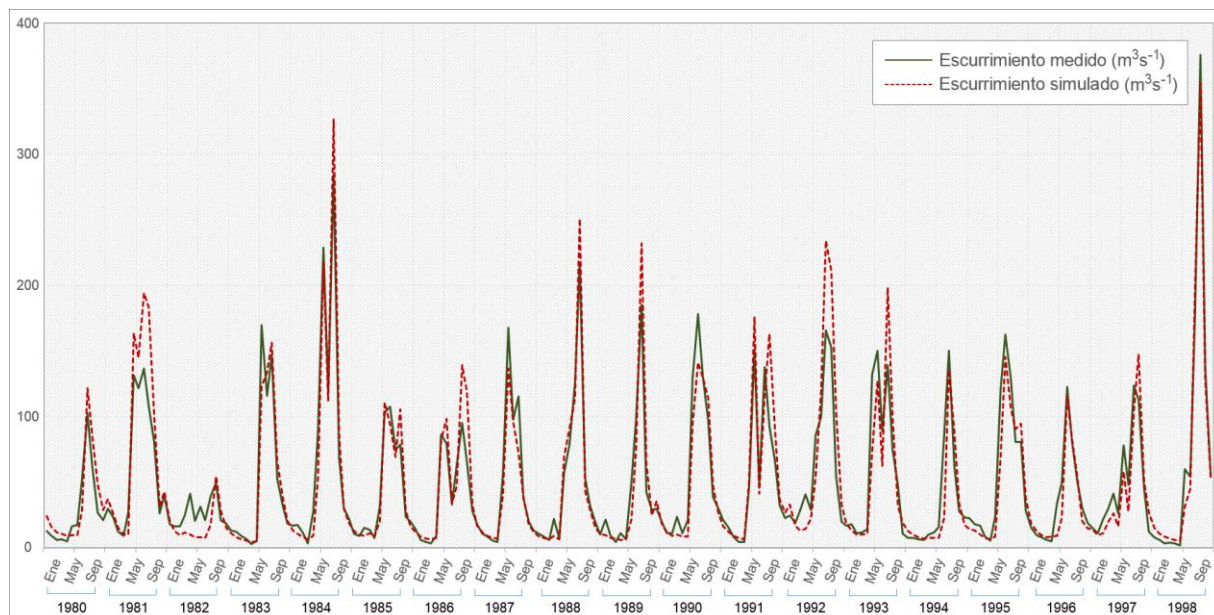
La subestimación de los escurrimientos máximos con este enfoque ha sido reportada en otros estudios realizados en China (Liu *et al.*, 2012; He *et al.*, 2015) y Estados Unidos (Li *et al.*, 2012; Tian *et al.*, 2012). Algunos otros han sido aplicados en Australia (Lee, 2006; Tromp, 2005), son importantes ya que en este país los eventos de huracanes son muy frecuentes así como en el nuestro.

### 8.3.2. Calibración de escurrimientos a nivel mensual

La calibración mensual de escurrimientos para el periodo de 1980-1998, tuvo como resultado valores de  $NSE=0.87$  y  $r^2=0.90$ . Estos índices son mayores a los reportados por Varado *et al.*, (2006), quienes calibraron los escurrimientos diarios y mensuales con el modelo REW, obteniendo valores de  $NSE=0.50$  y  $0.59$ , respectivamente.

Algunas de las diferencias con este estudio son la precipitación anual que se da en África Occidental (1,200 mm entre los meses de Abril y Octubre) y los tipos de suelos presentes, estos difieren con respecto a los de nuestro país ya que su horizonte superior tiene entre uno y dos metros de profundidad.

La Figura 35 muestra el comportamiento de los escurrimientos medidos y simulados a nivel mensual para la cuenca San Marcos y en forma consistente los escurrimientos máximos mensuales no presentan las diferencias reportadas en la calibración diaria. En los primeros años de calibración, el modelo tiende a sobreestimar y subestimar los escurrimientos mensuales y en los años subsecuentes las diferencias se minimizan mostrando un mejor ajuste.

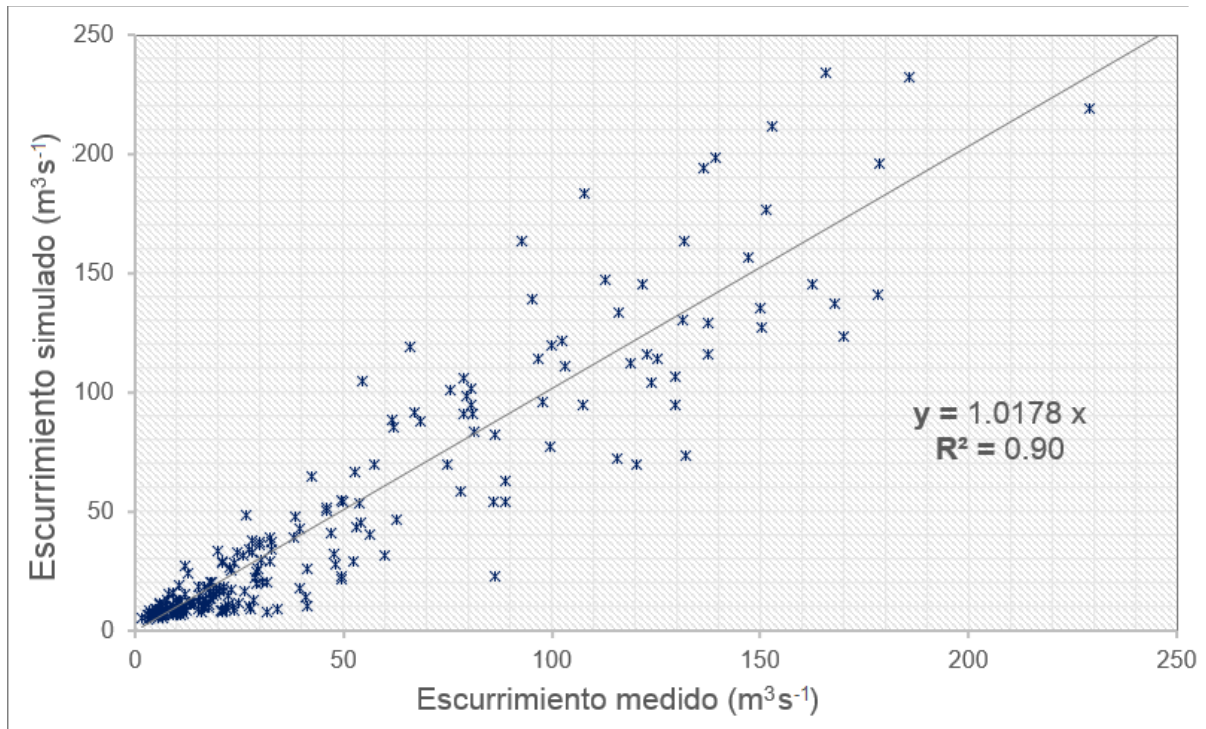


**Figura 35.** Ecurrimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel mensual (calibración).

Xu *et al.* (2015) presentan esta misma tendencia en sus resultados para la cuenca Huangnizhuang, en China, con variaciones en sobreestimación y subestimación de los escurrimientos, pero reportan valores de  $NSE=0.76$  para la calibración, lo cual, en la escala que presentan Moriasi *et al.* (2007), es muy bueno.

Los modelos que siguen el enfoque REW, en general simulan los escurrimientos a nivel diario con cierto grado de subestimación, sin embargo, Varado *et al.* (2006) reportaron que al utilizar el modelo REW-v4.0, los escurrimientos se sobreestimaron en la cuenca Donga, en África Occidental.

En la Figura 36 se presenta el análisis de regresión entre los escurrimientos mensuales medidos y simulados por el modelo REW durante el periodo de calibración, encontrando que existe una sobreestimación del 0.02% de los valores medidos y que el ajuste del modelo de  $r^2$  de 0.90 se considera muy bueno para la estimación de escurrimientos a nivel mensual.



**Figura 36.** Relación entre escurrimientos medidos y simulados a nivel mensual por el modelo REW durante el periodo de calibración (1980-1998).

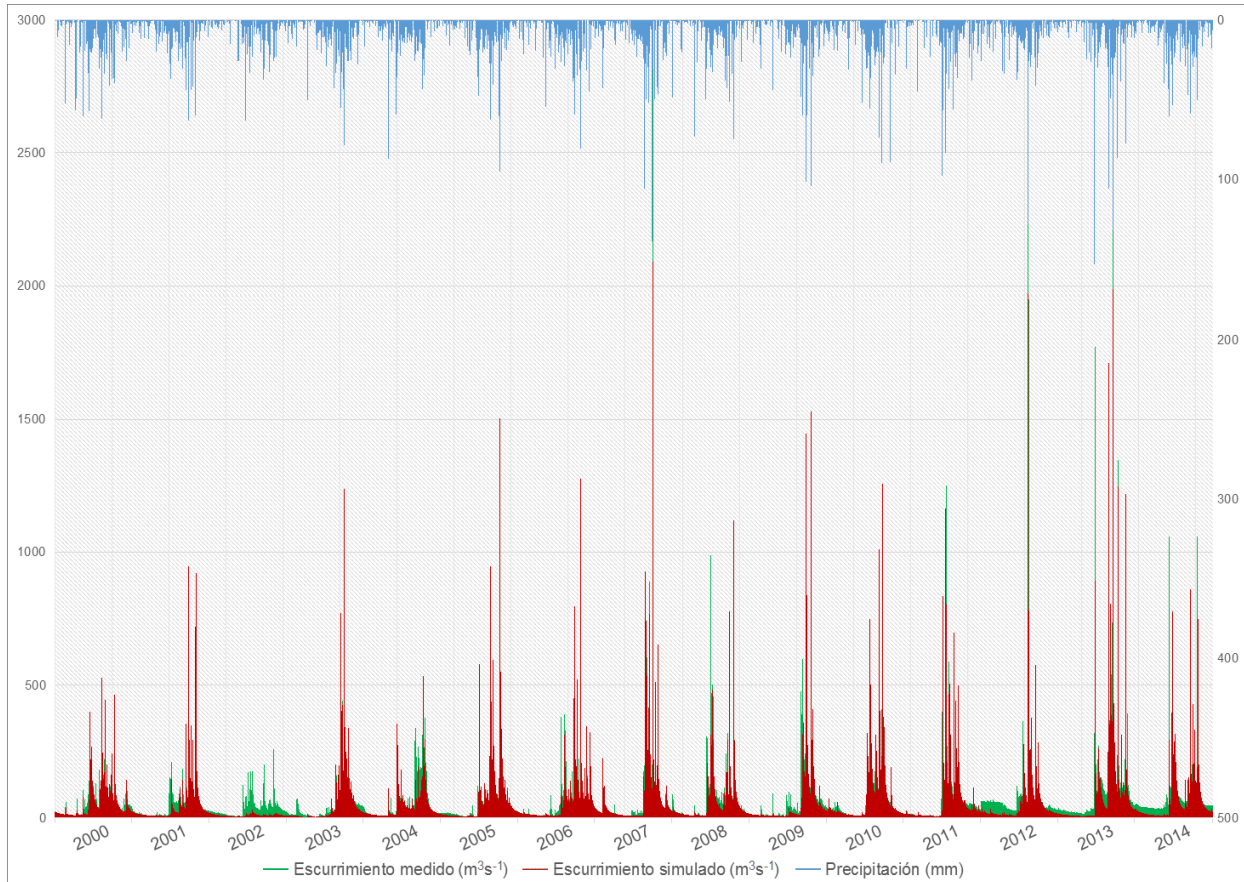
### 8.3.3. Validación de escurrimientos a nivel diario

Utilizando los parámetros del modelo calibrado, el modelo REW estimó los escurrimientos diarios y se compararon con los escurrimientos observados en los años 2000 a 2014. Para el periodo de validación, los estimadores de eficiencia muestran valores de  $NSE=0.57$  y  $r^2=0.61$ , inferiores a los que se obtuvieron en la calibración. En el periodo de validación se encontró que existe una subestimación de los escurrimientos máximos, siendo más notorio en los años 2002 y 2012 (Figura 37).

Los escurrimientos máximos observados a finales de los años de calibración, y en la validación, corresponden a la temporada de huracanes que se presenta de los meses de mayo y junio, que se pueden alargar hasta el mes de noviembre, en la zona de estudio.



Los escurrimientos máximos para los años 2007, 2012 y 2013, están asociados con los huracanes Dean, Ernesto, e Ingrid y Barry, respectivamente (SMN, 2012) y es notorio que el modelo REW no exhibe el mejor ajuste y los subestima.



**Figura 37.** Escurrimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel diario (validación).

Los indicadores de eficiencia de los periodos de validación reportados son inferiores a los obtenidos de los periodos de calibración como lo señalan Zhang y Savenije (2005), quienes obtuvieron valores de  $NSE=0.71$  en la calibración realizada para dos años en la cuenca Geer en Bélgica, el cual disminuyó hasta  $NSE=0.61$  en los dos años de validación.

La investigación de Tromp (2005), mostró una disminución significativa de  $NSE=0.66$  en dos años de calibración hasta  $NSE=0.37$  en cuatro años de validación para la cuenca del río Collie en Australia Occidental, mientras que el estudio de Lee (2006) exhibió un comportamiento similar para la cuenca Susannah Brook en la misma área, pasando de  $NSE=0.69$  a  $0.57$  con cinco años de calibración y validación.

Zhang *et al.* (2006), observaron valores parecidos para la Cuenca Hesperange en Luxemburgo, pasando de un valor de NSE de 0.71 a uno de 0.65, para tres años de calibración y uno de validación, correspondientemente.

En otra parte de la investigación de Lee (2006), se utilizó el modelo *Cooperative Community Catchment model based on the Representative Elementary Watershed approach* (CREW) para simular los escurrimientos de la cuenca Howard Springs (HS) y compararlos con los de la cuenca del río Collie (CR). En ocho años de simulación de escurrimientos, reportaron un valor para HS de  $NSE=0.71$ , mientras que para CR el valor no fue del todo satisfactorio ( $NSE=0.51$ ), se concluye que estas diferencias se deben a diferencias en el clima y las características del paisaje.

He *et al.* (2015), evaluaron la eficiencia del modelo *Tsinghua Representative Elementary Watershed* (THREW) para simular los escurrimientos de la cuenca Tailan en China, con valores de  $NSE=0.88$  para cinco años de calibración y  $NSE=0.75$  para cinco años de validación. Xu *et al.* (2015), indican una disminución del índice de Nash-Sutcliffe, aunque no considerable, de 0.76 a 0.75 en ambos periodos.

Otros autores han reportado que los índices de eficiencia del modelo REW para estimar escurrimientos, son mayores en el periodo de validación que en el de calibración. Liu *et al.* (2012) encontraron que en la calibración del modelo THREW en la cuenca del río Wei en China, los indicadores de eficiencia fueron  $NSE=0.44$  y  $r^2=0.44$ , y en el proceso de validación en la cuenca del río Chabagou, se logró aumentar los índices de NSE a 0.63 y  $r^2$  a 0.65.

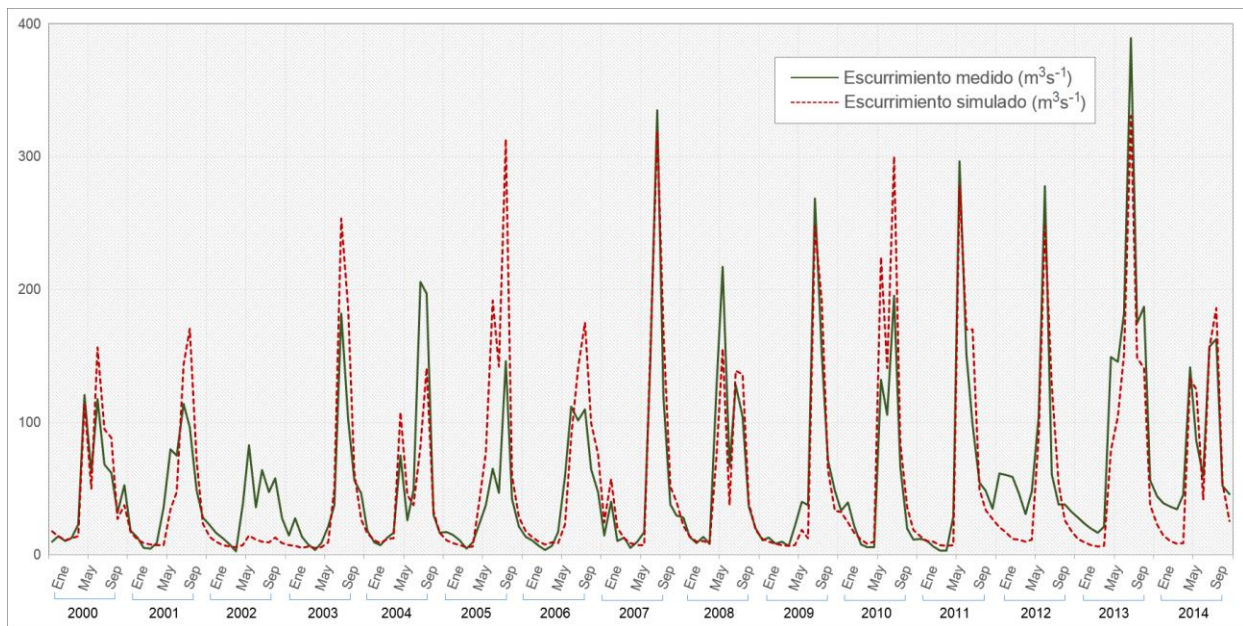
Tian *et al.* (2012) encontraron valores de  $NSE=0.52$  para ocho años de calibración y  $NSE=0.58$  para cinco años de validación con el modelo THREW; cabe mencionar que los valores de dichos estudios son inferiores que los que se obtuvieron para la cuenca San Marcos.

Mou *et al.* (2008), aplicaron este modelo en la cuenca Urumqui, en China en un periodo de calibración de cinco años, encontraron un coeficiente de determinación de  $r^2=0.65$ , mayor que  $r^2=0.57$  estimado en tres años de validación. Taibi *et al.* (2011) utilizaron un modelo basado en el enfoque REW y obtuvieron un valor similar, de  $r^2=0.58$ , para cinco años de simulación en la Cuenca Zwalm en Bélgica.

### 8.3.4. Validación de escurrimientos a nivel mensual

Los valores de NSE y  $r^2$ , que se obtuvieron a nivel mensual para la cuenca San Marcos, fueron de 0.74 y 0.78 respectivamente. Los índices de eficiencia en la estimación de los escurrimientos mensuales se incrementaron en contraste con los diarios, lo que indica un mejor ajuste de los escurrimientos simulados por el modelo, no obstante, estos siguen siendo menores a los reportados en la calibración.

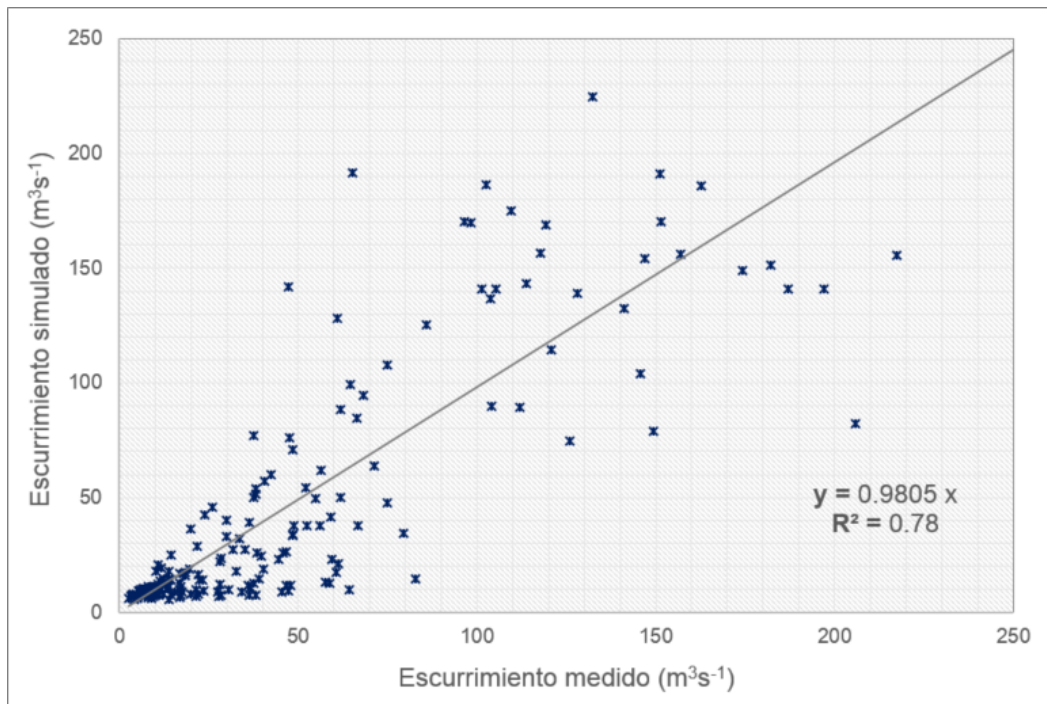
En la Figura 38 se muestran los escurrimientos medidos y los simulados a nivel mensual en el periodo de 2000-2014 (validación). Se observa que el modelo subestima los escurrimientos para los años 2002 y 2012, esto se puede deber a que los valores de precipitación que se utilizaron como insumos para esos años, también fueron menores.



**Figura 38.** Escurrimientos medidos y simulados por el modelo REW a nivel mensual (validación).

Como parte de la evaluación del desempeño del modelo al simular los datos de escurrimientos para el periodo de validación, la Figura 39 muestra la correlación de los escurrimientos medidos y simulados, el cual indica una ligera subestimación de 0.02% en la predicción como lo explica la pendiente de la recta de 0.98. Este comportamiento contrasta con el mostrado en el periodo de calibración, el cual sobreestima los datos en la misma proporción.





**Figura 39.** Relación entre escurrimientos medidos y simulados a nivel mensual por el modelo REW durante el periodo de validación (2000-2014).

Varado *et al.*, (2006), estimaron los escurrimientos diarios y mensuales y encontraron índices de NSE de 0.51 y 0.58 en la validación del modelo REW en un periodo de cinco años, en una cuenca de África Occidental con condiciones climáticas similares a la cuenca San Marcos; los índices de eficiencia de este estudio fueron mayores a los reportados por estos autores.

En la última década se ha buscado desarrollar aportaciones importantes con respecto a la implementación del enfoque REW en diferentes casos. Vannamettee *et al.* (2012) evaluaron la respuesta de un modelo basado en el enfoque, planteando distintos escenarios de escurrimiento (alto y bajo) y obtuvieron, para todos ellos, valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe entre 0.7 y 1, para la simulación de los escurrimientos.

En 2017, Elgamal *et al.* calibraron y validaron el modelo REW en la Cuenca del Río Magdalena en Colombia, encontrando valores de  $NSE=0.62\sim 0.74$  para dos estaciones hidrométricas. Li *et al.* (2018) reportaron valores superiores a 0.8 del índice de NSE en cuatro estaciones de aforo que indican un ajuste excelente.

Zehe *et al.* (2006) y Lee *et al.* (2007) lograron valores de  $NSE=0.82$ , en la cuenca Weiherbach de Alemania, los cuales son de los más altos registrados para la aplicación del enfoque.

#### 8.4. Eficiencia del modelo REW

El desempeño del modelo REW en la estimación de escurrimientos para la cuenca San Marcos, se muestra en el Cuadro 9. Los ajustes presentados varían en un rango “Bueno” a “Excelente”, de acuerdo con la escala que proponen Moriasi *et al.* (2007). Comparando los índices de eficiencia obtenidos en este estudio y los reportados por otros autores, se concluye que el modelo es capaz de predecir adecuadamente los escurrimientos.

**Cuadro 9.** Evaluación de la eficiencia predictiva del modelo REW.

Evaluación	Periodo	$r^2$	NSE	Ajuste
Calibración	1980-1998 Diario	0.72	0.67	Muy bueno
	1980-1998 Mensual	0.90	0.87	Excelente
Validación	2000-2014 Diario	0.61	0.57	Bueno
	2000-2014 Mensual	0.78	0.74	Muy bueno

Los procesos que estudia la hidrología son complejos e involucran bastantes variables, por ello, Aparicio (1992) ha sugerido que es complicado, prever si alguna vez se aproximará al status de ciencia exacta o, incluso, si alguna vez podrá llegar a ser completamente considerada como una ciencia independiente. Musy y Higy (2010), mencionan que, a una escala regional, continental o global, describir el ciclo hidrológico por medio de ecuaciones de conservación tiene cierta relevancia porque permite hacer comparaciones y cambios en las reservas de agua.

Yokoo y Sivapalan (2006), señalan que el modelo REW es equiparable a los modelos que ejecutan un balance de agua con descripciones de procesos hidrológicos, no obstante, Lee *et al.* (2005) señalan que las ecuaciones de balance del modelo fueron derivadas de manera integral para todas las unidades REW, en vez de deducirse por separado para cada proceso diferente, como es el caso con muchos modelos tradicionales.

Fenicia *et al.* (2014) sugirieron que a pesar de que se cuentan con diversos modelos hidrológicos en la actualidad, aún se requiere de trabajo considerable para comprender cómo hacer el mejor uso de diferentes mediciones y observaciones visuales para caracterizar los procesos dominantes en una cuenca. Esta conjetura, mantiene validez hasta hoy, en tanto, se siguen desarrollando y perfeccionando otros modelos basados en el enfoque REW que permiten simular variables hidrológicas por medio de procesos con cierto grado de confiabilidad.

Zehe *et al.* (2014) contrastan que todas las aplicaciones de modelos integrantes del enfoque REW hasta ahora, tratan las subcuencas y las REW como sinónimos y los flujos dentro de los volúmenes de control en una forma cero-dimensional espacialmente promediada; para ellos, esto representa una desventaja ya que implica promediar a través de diferentes conjuntos, por ejemplo, tipos de suelos.

Sin embargo, por presentar la singular estructura que los caracteriza, los modelos basados en el enfoque termodinámico REW, han seguido evolucionando y se ha logrado ampliar la perspectiva que abordan, hasta incorporar elementos más sofisticados, tales como los macroporos que generan la fauna edáfica, las lecturas térmicas de sensores remotos, entre otros, con la finalidad de dar explicación a los procesos que ocurren en la cuenca (Müller *et al.*, 2014; Zehe *et al.*, 2013, 2014).

## **9. CONCLUSIONES**

La definición de unidades que realizó el modelo REW en la cuenca San Marcos, en las cuales se calculan los diferentes flujos y procesos, es eficiente para la estimación de escurrimientos a nivel diario.

El modelo REW se calibró y validó de manera satisfactoria al estimar en forma aceptable los escurrimientos mensuales y diarios como se demuestra con el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación.

La aplicación del modelo REW permitirá predecir el efecto de los escenarios de manejo de los recursos en el comportamiento de la producción de agua en la cuenca San Marcos, que puede ayudar a los responsables de los planes de manejo a identificar zonas prioritarias para la conservación del suelo y el manejo de la cobertura vegetal de la cuenca.

## 10. RECOMENDACIONES

- Probar el enfoque REW en cuencas de zonas áridas de nuestro país con datos hidrométricos limitados.
- Revisar versiones posteriores del modelo REW en donde se incorporan propiedades edáficas (por ejemplo, porosidad) relacionadas con procesos hidrológicos (infiltración, escurrimientos, percolación) y probar esas adecuaciones con una cuenca de nuestro país.
- Realizar el cálculo de escurrimientos con el modelo REW, integrando un Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5 m para el preprocesamiento de cuencas no mayores a 100 km<sup>2</sup>, dado al costo de estos modelos.
- Simular los escurrimientos de la cuenca San Marcos mediante otros modelos de uso común en el país (SWAT, HEC-HMS) para comparar los resultados y determinar cuál es más eficiente para este fin.
- Integrar los resultados de este estudio como complemento informativo y de análisis en el documento vigente de Ordenamiento Ecológico del Territorio.
- Presentar los resultados al Consejo de Cuenca responsable de la administración de la cuenca San Marcos.

## 11. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G. L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. The Food and Agriculture Organization (FAO). Rome, Italy. 300 p.
- Aparicio, F. 1992. Fundamentos de Hidrología de Superficie. 1era reimpresión. Editorial Limusa. México, D.F. 302 p.
- Arabi M., R.S. Govindaraju, M. Sophocleous, and J.K. Koelliker. 2006. Chapter 20: Use of Distributed Models for Watershed Management: Case Studies In: Singh V. and Frevert D. (Eds.). Watershed Models. CRC Press: Boca Raton, Florida. Pp: 503-526.
- Aral M., M. and O. Gunduz. 2006. Chapter 4: Large-Scale Hybrid Watershed Modeling. In: Singh V. and Frevert D. (Eds.). Watershed Models. CRC Press: Boca Raton, Florida. Pp: 75-95.
- Arcement Jr., G.J. and V.R. Schneider. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339. U.S. Department of Interior. Denver, CO, USA. 38 p.
- Baldemar M., A. 2005. Aplicación hidrológica de los radares meteorológicos. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 177 p.
- Band, L. E. 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. Water resources research, 22(1):15-24.
- Bárdossy, A. 2007. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 11(2):703-710.
- Benavides S., J. de D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Especialidad Forestal, Montecillo, México. 261 p.
- Benavides S., J. de D., J. G., Flores G., M. J., González G., D. A., Moreno G., J. R. Valdez L. y J. A. Ruiz C. 2005. Modelaje hidrológico aplicando el modelo SWAT en la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco. En: Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Almanza et al. (Eds.) 26-28 de octubre de 2005. Universidad Autónoma de Chihuahua. Delicias, Chihuahua. Pp: 280-292.
- Beven, K. J. 2002. Towards an Alternative Blueprint for a Physically Based Digitally Simulated Hydrologic Response Modelling System. Hydrological. Processes, 16: 189-206.
- Beven, K. J. 2012. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons. West Sussex, UK. 488 p.

- Burns, I.S., S.N. Scott, L.R. Levick, D.J. Semmens, S.N. Miller, M. Hernandez, D.C. Goodrich, and W.G. Kepner. 2007. Automated Geospatial Watershed Assessment 2.0 (AGWA 2.0): A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 145 p.
- Caldera, H. P. G. M., V. R. P. C. Piyathisse, and K. D. W. Nandalal. 2016. A Comparison of Methods of Estimating Missing Daily Rainfall Data. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka* 49(4);1-8.
- Campos A., D.F. 1998. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. 3ª impresión, Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, México. 529 p.
- Campos A., D.F. 2007. *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. 1ª reimpresión, Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, México. 333 p.
- Campozano, L., E. Sánchez, A. Aviles, and E. Samaniego. 2015. Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature: The case of the Ecuadorian Andes. *Maskana* 5(1):99-115.
- Carretero, S. 2011. *Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Buenos Aires, Argentina. 429 p.
- Chow, V. T. 1962. *Hydrological determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins*, Rep., University of Illinois, Urbana Champaign, United States. 104 p.
- Chow, V.T., D.R. Maidment, y L.W., Mays. 1994. *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. 584 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2008. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Consultado enero de 2018. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>.
- Curry, J. A., and P. J. Webster. 1999. *Thermodynamics of Atmospheres and Oceans*, Academic Press, San Diego, California, USA. 465 p.
- De Silva, R. P., N. D. K. Dayawansa, and M. D. Ratnasiri. 2007. A comparison of methods used in estimating missing rainfall data. *Journal of Agricultural Sciences* 3(2):101-108.
- Deckers, J., O. Spaargaren, y F. Nachtergaele. 1998. *Base referencial mundial del recurso suelo*. FAO, SICS, ISRIC. Roma, Italia. 117 p.
- Dingman, S. L. 2015. *Physical Hydrology*. Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois, USA. 643 p.



- Domnița, M. 2012. Runoff modeling using GIS. Application in torrential basins in the 591 Apuseni Mountains. Tesis de Doctorado. University Cluj-Napoca. Cluj Napoca, Rumania. 271 p.
- Dooge, J. 1968. The Hydrologic Cycle as a Closed System. *Hydrological Sciences Journal*, 13(1):58-68.
- Douglas M., K. R., R. Srinivasan, and J. G. Arnold. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Trans. ASABE*, 53(5):1423-1431.
- Ehret, U., H. V. Gupta, M. Sivapalan, S. V. Weijs, S. J. Schymanski, G. Blöschl, A. N. Gelfan, C. Harman, A. Kleidon, T. A. Bogaard, D. Wang, T. Wagener, U. Scherer, E. Zehe, M. F. P. Bierkens, G. Di Baldassarre, J. Parajka, L. P. H. van Beek, A. van Griensven, M. C. Westhoff, and H. C. Winsemius. 2014. Advancing catchment hydrology to deal with predictions under change. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18:649–671.
- Elgamal, A., P. Reggiani, and A. Jonoski. 2017. Impact analysis of satellite rainfall products on flow simulations in the Magdalena River basin, Colombia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9(1):85–103.
- Engelen, G.B. and F.H. Kloosterman. 1996. *Hydrological Systems Analysis: Methods and Applications*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 152 p.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2011. *Healthy Watersheds Initiative: National Framework and Action Plan*. Washington, DC, USA. 20 p.
- Fencia F., G.P. Zhang, T.H.M. Rientjes, P. Reggiani, L. Pfister and H.H.G. Savenije. 2003. Modelling of surface water – groundwater interaction on the Alzette river basin in Luxembourg. *Proceedings NCR days 2003*. The Netherlands. Pp:12-14.
- Fencia, F., Zhang, G. P., Rientjes, T., Hoffman, L., Pfister, L., and Savenije, H. H. G. 2005. Numerical simulations of the runoff generation with surface water – groundwater interactions in the Alzette river alluvial plain, *Phys. Chem. Earth*, 30(4–5 Spec. Iss.):277–284.
- Fencia, F., D. Kavetski, H. H. G. Savenije, M. P. Clark, G. Schoups, L. Pfister, and J. Freer. 2014. Catchment properties, function, and conceptual model representation: Is there a correspondence?, *Hydrol. Processes*, 28(4):2451–2467.
- Frana, A. S. 2012. *Applicability of MIKE SHE to simulate hydrology in heavily tile drained agricultural land and effects of drainage characteristics on hydrology*. MSc Diss. Iowa State University. 138 p.
- Freeze, R. A. and R. L. Harlan. 1969. Blueprint for a physically-based, digitally simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 9:237-258.

- Garbrecht, J. and L. W. Martz. 1997. The Assignment of Drainage Direction Over Flat Surfaces in Raster Digital Elevation Models. *Journal of Hydrology* 193:204-213.
- Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, y J. G. Arnold. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. 100 p.
- Gondwe B., R.N., G. Merediz A. and P. Bauer G. 2011. The influence of conceptual model uncertainty on management decisions for a groundwater-dependent ecosystem in karst. *Journal of hydrology* 400(1-2):24-40.
- Hao, X., V., Novotny, and V. Nelson (Eds.). 2010. *Water Infrastructure for Sustainable Communities*, International Water Association Publishing, London, UK. 680 p.
- He, Z. H., F. Q. Tian, H. V. Gupta, H. C. Hu, and H. P. Hu., 2015. Diagnostic calibration of a hydrological model in a mountain area by hydrograph partitioning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4):1807.
- Hydrology Project Technical Assistance. 1999. How to correct and complete rainfall data. New Delhi, India. 23 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1980. Carta geológica serie II, escala 1:250 000 (continuo nacional). Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en enero de 2018. Recuperado de [http:// www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2000. Datos vectoriales de unidades climáticas escala 1:1 000 000. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Consultado en enero de 2018. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/infoescala.aspx>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2006. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1:250 000 serie II (continuo nacional). Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en enero de 2018. Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial\\_serieii.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012. Continental - Continuo de elevaciones mexicano, CEM. Modelo digital de elevaciones escala 1:50 000. Versión 3.0. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en enero de 2018. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2016. Conjunto de datos vectorial uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI (continuo nacional). Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Consultado en enero de 2018. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ usosuelo>.

- Jones, J.A.A. 1997. *Global hydrology: processes, resources and environmental management*, Florence Taylor and Francis, Harlow, Essex, England: Longman. 414 p.
- Kleidon, A., E. Zehe, U. Ehret, and U. Scherer. 2013. Thermodynamics, maximum power, and the dynamics of preferential river flow structures at the continental scale, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17:225–251.
- Lee, H. 2006. *Development and Performance Analysis of a Physically Based Hydrological Model Incorporating the Effects of Subgrid Heterogeneity*. PhD Thesis. The University of Western Australia. School of Environmental Systems Engineering. Australia. 211 p.
- Lee, H., M. Sivapalan, and E. Zehe. 2005. Representative Elementary Watershed (REW) approach, a new blueprint for distributed hydrologic modelling at the catchment scale: the development of closure relations, In: Spence C., J.W. Pomeroy and A. Pietroniro (Eds.). *Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions*. Canadian Water Resources Association (CWRA), Canada. 218 p.
- Lee, H., E. Zehe, and M. Sivapalan. 2007. Predictions of rainfall-runoff response and soil moisture dynamics in a microscale catchment using the CREW model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(2):819–849.
- Li, H., M. Sivapalan, and F. Tian. 2012. Comparative diagnostic analysis of runoff generation processes in Oklahoma DMIP2 basins: The Blue River and the Illinois River. *Journal of hydrology*, 418:90-109.
- Li, Y., Y. Jiang, X. Lei, F. Tian, H. Duan, and H. Lu. 2018. Comparison of Precipitation and Streamflow Correcting for Ensemble Streamflow Forecasts. *Water*, 10(2):1-17.
- Liu, D., F. Tian, H. Hu, and H. Hu. 2012. The role of run-on for overland flow and the characteristics of runoff generation in the Loess Plateau, China. *Hydrological sciences journal*, 57(6):1107-1117.
- Loucks, D.P. and E. Van Beek. 2005. *Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications*. UNESCO, Paris. 680 p.
- Martínez C., J. 2013. *Manejo y Calibración de un Modelo Hidrológico de Parámetros Distribuidos y su Aplicación para la Estimación de Eventos de Diseño*, en la Cuenca del río Armería. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Civil - Aprovechamientos Hidráulicos. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 209 p.
- Minville, M., D. Cartier, C. Guay, L. A. Leclaire, C. Audet, S. Le Digabel, and J. Merleau. 2014. Improving process representation in conceptual hydrological model calibration using climate simulations. *Water Resources Research*, 50(6):5044-5073.

- Molina N., E., M. Hallack A., S. Martínez P., J. Ramírez H., A. Mungaray M., and A. Sastre M. 2016. Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management*, 175:29-42.
- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Binger, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of ASABE*. 50(3):885-900.
- Mou, L., F. Tian, H. Hu, and M. Sivapalan. 2008. Extension of the Representative Elementary Watershed approach for cold regions: constitutive relationships and an application, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12:565–585.
- Müller, B., M. Bernhardt, and K. Schulz. 2014. Identification of catchment functional units by time series of thermal remote sensing images. *Hydrology and Earth System Sciences*, (12):5345-5359.
- Musy A. and C. Higy. 2010. *Hydrology: A science of nature*. CRC Press Taylor & Francis Group. Enfield, New Hampshire, USA. 326 p.
- Nagelkerke, N. J. D. 1991. A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination. *Biometrika*. 78(3):691–2.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3):282–290.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2011a. Guía para prácticas hidrológicas: Hidrología – De la medición a la información Hidrológica. Volumen I, OMM N° 168, Serie Tiempo – Clima – Agua. 323 p.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2011b. Guía para prácticas hidrológicas: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. Volumen II, OMM N° 168, Serie Tiempo – Clima – Agua. 329 p.
- Oropeza M., J. L. 1990. Simulation des écoulements des cours d'eau dans le petits bassins versants ruraux. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. Departement de Génie Rural. Belgique. 203 p.
- Overton, D.E. and M. E. Meadows. 2013. *Stormwater Modeling*. Elsevier. New York, USA. 370 p.
- Paulhus, J. L., and M. A. Kohler. 1952. Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review* 80(8):129-133.
- Pereyra D., D., J.A.A. Pérez S. y M.R. Salas O. 2010. Hidrología. In: Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz Vol. 1. Florescano, E. y J. Ortiz (Coord.). Gobierno del Estado de Veracruz: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana: Universidad Veracruzana, México. pp:85–122.

- Pissarra, T. C. T., W. Politano, e A. S. Ferraudo. 2004. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 28:297-305.
- Ponce, V. M. 1989. *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 640 p.
- Refsgaard, J. and J. Knudsen. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research* 32(7):2189-2202.
- Reggiani, P., M. Sivapalan, and S. M. Hassanizadeh. 1998. A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. *Advances in Water Resources*, 22(4): 367-398.
- Reggiani, P., S. M. Hassanizadeh, M. Sivapalan, and W. G. Gray. 1999. A unifying framework for watershed thermodynamics: constitutive relationships. *Advances in Water Resources*, 23(1):15-39.
- Reggiani, P., M. Sivapalan, S. M. Hassanizadeh, and W. G. Gray. 2001. Coupled equations for mass and momentum balance in a stream network: theoretical derivation and computational experiments. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 457(2005):157-189.
- Reggiani, P. and T. H. M. Rientjes. 2005. Flux parameterization in the representative elementary watershed approach: application to a natural basin, *Water Resources Research*. 41:1-18.
- Reggiani, P. and S.M. Hassanizadeh. 2016. Mega-scale thermodynamics in the presence of a conservative field: the watershed case. *Adv. Water Resour.* 97:73–86
- Reinoso, P. L. G. 2016. Imputación de Datos en Series de Precipitación Diaria Caso de Estudio cuenca del río Quindío. *Ingeniare* 18:73-86.
- Renschler, C. S. 2005. Scales and uncertainties in using models and GIS for volcano hazard prediction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139(1-2):73-87.
- Rew, R., G. Davis, S. Emmerson, H. Davies, E. Hartnett, and D. Heimbigner. 2011. *The NetCDF Users Guide*. Unidata Program Center. University Corporation for Atmospheric Research. Colorado, USA. 103 p.
- Rojas S., D. y M. G. González P. 2015. Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2):69-83.

- Salas M., R., L.A. Ibáñez C. R. Arteaga R., M.R. Martínez M. y D.S. Fernández R. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48(1):1-15.
- Sánchez G., M., D. S. Fernández R., M. Martínez M., E. Rubio G., y J.D. Ríos B. 2017. Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5):141-156.
- Santhi, C. J. G. Arnold, J. R. William, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with points and nonpoint sources. *Water Resources Association* 37:1169-1188.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1970. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Boletín Hidrológico Num. 42. Región Hidrológica Num. 27. Tuxpan-Nautla. Tomo I. 115 p.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2010. Sistema de Información Climática Computadorizada (CLICOM). México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Consultado en enero de 2018. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2012. Base de datos de ciclones tropicales que impactaron a México de 1970 a 2011. México, DF: Subgerencia de Pronóstico Meteorológico, Servicio Meteorológico Nacional.
- Severance, C. 2013. Python for informatics: Exploring information. CreateSpace editions. Ann Arbor, MI, USA. 224 p.
- Singh, V. P. 1995. Chapter 1: Watershed modeling. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Singh, V. P. (Ed.) Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA. Pp:1-22.
- Suarez-Medina, M. D., C. Patiño-Gómez, J. Velázquez-Álvarez, J. Rivera-Benítez, E. Aguilar-Garduño, G. Bautista, y C. Astudillo-Enríquez. 2015. Aplicación del modelo de datos ArcHydro en el cálculo de disponibilidad de agua superficial. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6(1):175-181.
- Taibi, A.E., A. Elfeki and G. Zhang. 2011. Modeling hydrologic responses of the Zwalm catchment using the REW approach: Propagation of uncertainty in the soil properties to model output, *Arab. J. Geosci.*, 4:1005–1018.
- Tarboton, D. G. 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research* 33(2):309-319.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological processes*, 5(1):81-100.



- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. 1992. A physical basis for drainage density. *Geomorphology*, 5(1/2):59-76.
- Teegavarapu, R. S., and V. Chandramouli. 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. (IDW). *Journal of Hydrology* 312(1):191-206.
- Tian, F., H. Hu, and Z. Lei. 2008. Thermodynamic watershed hydrological model: Constitutive relationship. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 51(9):1353-1369.
- Tian, F., H. Li, and M. Sivapalan. 2012. Model diagnostic analysis of seasonal switching of runoff generation mechanisms in the Blue River basin, Oklahoma. *Journal of hydrology*, 418:136-149.
- Torres B., E., E. Mejía S., J. Cortés B., E. Palacios V., y A. Exebio G. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia*, 39(5):481-490.
- Tromp, E. 2005. Application of a semi-distributed hydrological model based on the REW approach to the Collie River Basin, Western Australia. M.Sc. Thesis. Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Applied Geosciences, Department of Water Management. Perth, Australia. 123 p.
- Vannamettee, E. 2014. Hydrograph prediction in ungauged basins: Development of a closure relation for Hortonian runoff. PhD. Thesis. Utrecht University. Department Physical Geography Faculty of Geosciences. Utrecht, Netherlands. 178 p.
- Vannamettee, E., D. Karssenbergh, and M. F. P. Bierkens. 2012. Towards closure relations in the Representative Elementary Watershed (REW) framework containing observable parameters: Relations for Hortonian overland flow. *Advances in water resources*, 43:52-66.
- Varado, N., I. Braud, S. Galle, M. Le Lay, L. Séguis, B. Kamagate, and C. Depraetere. 2006. Multi-criteria assessment of the Representative Elementary Watershed approach on the Donga catchment (Benin) using a downward approach of model complexity. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(3):427-442.
- Vargas, R. B. and P. Gourbesville. 2016. Deterministic hydrological model for flood risk assessment of Mexico City. *Advances in Hydroinformatics*. Springer, Singapore, Pp:59-73.
- Vargas C., G., L. A. Ibáñez C., and R. Arteaga R. 2015. Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1):5-21.
- Velázquez, J. A., M. Troin y D. Caya. 2015. Hydrological Modeling of the Tampaon River in the Context of Climate Change. *Tecnología y Ciencias del Agua* 6(5):17-30.



- Velázquez, J. A., M. Troin y R. Dávila O. 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería. Investigación y Tecnología* 18(3):341-351.
- Wagener, T., M. Sivapalan, P. A. Troch, B. L. McGlynn, C. J. Harman, H. V. Gupta, P. Kumar, P. S. C. Rao, N. B. Basu, and J. S. Wilson. 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 46:W05301.
- Xu, Q., X. Chen, J. Bi, R. Ouyang, and L. Ren. 2015. Simulating hydrological responses with a physically based model in a mountainous watershed. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 370:1-53.
- Yokoo, Y., and M. Sivapalan. 2006. Effect of capillary rise on subsurface runoff in the REW modeling framework. *Proceedings Of Hydraulic Engineering*, 50:55-60.
- Zehe, E., H. Lee, and M. Sivapalan. 2006. Dynamical process upscaling for deriving catchment scale state variables and constitutive relations for meso-scale process models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(6):981-996.
- Zehe, E., T. Blume, A. Kleidon, U. Ehret, U. Scherer, and M. Westhoff. 2013. A thermodynamic approach to link self-organization, preferential flow and rainfall-runoff behaviour. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17:4297-4322.
- Zehe, E., U. Ehret, L. Pfister, T. Blume, B. Schroeder, M. Westhoff, C. Jackisch, S. J. Schymanski, M. Weiler, K. Schulz, N. Allroggen, J. Tronicke, L. Van Schaik, P. Dietrich, U. Scherer, J. Eccard, V. Wulfmeyer, and A. Kleidon. 2014. HESS Opinions: From response units to functional units: a thermodynamic reinterpretation of the HRU concept to link spatial organization and functioning of intermediate scale catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11): 4635-4655.
- Zhang, G. 2007. Modelling hydrological response at the catchment scale: Application and extension of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. Tesis de Doctorado. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. 197 p.
- Zhang, G. P., and H. H. G. Savenije. 2005. Rainfall-runoff modelling in a catchment with a complex groundwater flow system: Application of the representative elementary watershed (REW) approach, *Hydrol. EarthSyst. Sci.*, 9:243-259.
- Zhang, G. P., F. Fenicia, T. H. M. Rientjes, P. Reggiani, and H. H. G. Savenije. 2005. Modeling runoff generation in the Geer river basin with improved model parameterizations to the REW approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(4-5):285-296.
- Zhang, G. P., H. H. G. Savenije, F. Fenicia, and L. Pfister. 2006. Modelling subsurface storm flow with the Representative Elementary Watershed (REW) approach: application to the Alzette River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(6):937-955.

## 12. ANEXOS

### A1. Ejemplo de resultados de corrida de calibración del modelo REW.

<b>Rew</b>	25				
<b>Área de REW</b>	0.5	km <sup>2</sup>			
<b>Área de contribución</b>	1631.6	km <sup>2</sup>			
<b>Coordenadas del centroide</b>	583039.1424	2303693.321			
	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Precipitación medida (mm)</b>	<b>Evaporación medida (mm)</b>	<b>Temperatura medida (°C)</b>	<b>Escurrimiento (m3/s)</b>
01/01/1980	0	1.8	2.3	2.3	31.1197
02/01/1980	86400	0.7	2	2	30.5327
03/01/1980	172800	7.2	2.1	2.1	29.8076
04/01/1980	259200	0.9	2.3	2.3	30.4102
05/01/1980	345600	0.2	1.8	1.8	28.857
06/01/1980	432000	0	3.1	3.1	28.1965
07/01/1980	518400	0	2.2	2.2	27.5989
08/01/1980	604800	0	3.2	3.2	27.0183
09/01/1980	691200	0.1	2.3	2.3	26.4662
10/01/1980	777600	0	4.3	4.3	25.9423
11/01/1980	864000	0	3.6	3.6	25.4279
12/01/1980	950400	2	2.6	2.6	24.933
13/01/1980	1036800	0	2.9	2.9	24.5454
14/01/1980	1123200	0	3	3	24.0411
15/01/1980	1209600	0	3.6	3.6	23.5918
16/01/1980	1296000	0.9	2.5	2.5	23.1599
17/01/1980	1382400	0.2	3.2	3.2	22.7791
18/01/1980	1468800	0.2	3	3	22.3613
19/01/1980	1555200	0	2.2	2.2	21.9724
20/01/1980	1641600	1.1	2.8	2.8	21.5885
21/01/1980	1728000	0.5	1.7	1.7	21.2575
22/01/1980	1814400	6.3	2.8	2.8	20.904
23/01/1980	1900800	7.4	1.9	1.9	20.7779
24/01/1980	1987200	1.7	1.8	1.8	20.5814
25/01/1980	2073600	5.5	1.5	1.5	20.1691
26/01/1980	2160000	1.2	1.6	1.6	20.0173
27/01/1980	2246400	0.7	3.1	3.1	19.6232
28/01/1980	2332800	0.5	2.9	2.9	19.2975
29/01/1980	2419200	0.1	3.3	3.3	19.2692
30/01/1980	2505600	0.3	2.6	2.6	18.7413
31/01/1980	2592000	6.3	1.8	1.8	18.46
01/02/1980	2678400	1.5	2.2	2.2	18.7731
02/02/1980	2764800	0.1	2	2	18.1424
03/02/1980	2851200	0	2.3	2.3	17.8521
04/02/1980	2937600	0	3.3	3.3	17.5991
05/02/1980	3024000	0	3.3	3.3	17.3388
06/02/1980	3110400	0.1	2.2	2.2	17.0933
07/02/1980	3196800	0	3.1	3.1	16.8599
08/02/1980	3283200	0	3.6	3.6	16.6255
09/02/1980	3369600	2.4	2.3	2.3	16.399
10/02/1980	3456000	0.3	2.4	2.4	16.2532
11/02/1980	3542400	0	2.7	2.7	16.0086
12/02/1980	3628800	0.3	2.7	2.7	15.7903

### A1. Continuación...

Fecha	Velocidad del cauce (m/s)	Ancho del cauce (m)	Profundidad del cauce (m)	Intercambio zonas r-o	Intercambio zonas r-s
01/01/1980	0	33.7377	0.7449	0.025	0.0044
02/01/1980	0.0001	42.1369	0.9303	0.0227	0.0045
03/01/1980	0.0001	41.8037	0.9229	0.0234	0.0044
04/01/1980	0.0001	42.0845	0.9291	0.0066	0.005
05/01/1980	0.0001	41.3576	0.9131	0.0277	0.0049
06/01/1980	0.0001	41.0439	0.9062	0.0224	0.0049
07/01/1980	0.0001	40.7543	0.8998	0.0241	0.0043
08/01/1980	0.0001	40.47	0.8935	0.0213	0.0042
09/01/1980	0.0001	40.1952	0.8874	0.0206	0.0042
10/01/1980	0.0001	39.931	0.8816	0.02	0.0041
11/01/1980	0.0001	39.6679	0.8758	0.0197	0.004
12/01/1980	0.0001	39.4114	0.8701	0.0193	0.0039
13/01/1980	0.0001	39.2084	0.8656	0.018	0.004
14/01/1980	0.0001	38.9405	0.8597	0.0185	0.004
15/01/1980	0.0001	38.6988	0.8544	0.0181	0.0039
16/01/1980	0.0001	38.4636	0.8492	0.0178	0.0038
17/01/1980	0.0001	38.2538	0.8446	0.0171	0.0038
18/01/1980	0.0001	38.0207	0.8394	0.0172	0.0038
19/01/1980	0.0001	37.8012	0.8346	0.0168	0.0037
20/01/1980	0.0001	37.582	0.8297	0.0165	0.0036
21/01/1980	0.0001	37.3909	0.8255	0.016	0.0037
22/01/1980	0.0001	37.1846	0.821	0.0156	0.0036
23/01/1980	0.0001	37.1108	0.8193	0.0139	0.004
24/01/1980	0.0001	36.9945	0.8168	0.0135	0.0046
25/01/1980	0.0001	36.7476	0.8113	0.0153	0.0046
26/01/1980	0	36.657	0.8093	0.0118	0.005
27/01/1980	0	36.4161	0.804	0.0151	0.005
28/01/1980	0	36.2156	0.7996	0.0148	0.005
29/01/1980	0	36.2003	0.7992	0.0075	0.0049
30/01/1980	0	35.8671	0.7919	0.0164	0.0048
31/01/1980	0	35.6892	0.7879	0.014	0.0048
01/02/1980	0	35.8913	0.7924	0.0029	0.0052
02/02/1980	0	35.4843	0.7834	0.0166	0.0052
03/02/1980	0	35.297	0.7793	0.013	0.0051
04/02/1980	0	35.1301	0.7756	0.0167	0.0043
05/02/1980	0	34.9588	0.7718	0.0132	0.0042
06/02/1980	0	34.7949	0.7682	0.0127	0.0042
07/02/1980	0	34.6374	0.7647	0.0124	0.0041
08/02/1980	0	34.4778	0.7612	0.0122	0.004
09/02/1980	0	34.322	0.7578	0.0121	0.0039
10/02/1980	0	34.2212	0.7555	0.0113	0.0041
11/02/1980	0	34.0502	0.7518	0.0117	0.004
12/02/1980	0	33.8963	0.7484	0.0116	0.0039
13/02/1980	0	33.7547	0.7452	0.0114	0.0039
14/02/1980	0	33.6051	0.7419	0.0114	0.0038
15/02/1980	0	33.4621	0.7388	0.0112	0.0037
16/02/1980	0	33.3197	0.7356	0.0111	0.0037
17/02/1980	0	33.2322	0.7337	0.0103	0.0038
18/02/1980	0	33.0927	0.7306	0.0103	0.0038
19/02/1980	0	32.9417	0.7273	0.0108	0.0038

## A2. Ejemplo de resultados de corrida de validación del modelo REW.

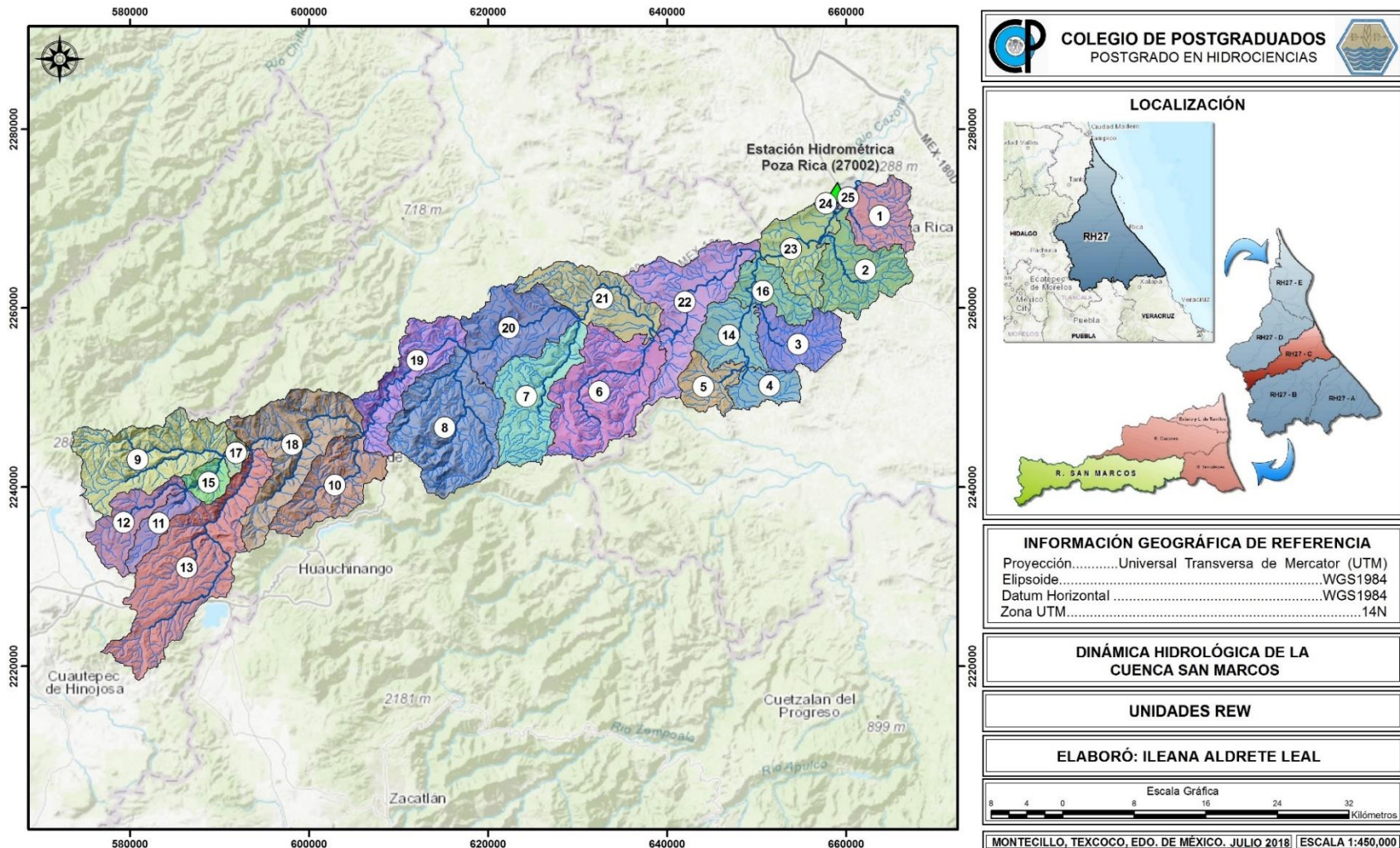
<b>Rew</b>	25				
<b>Área de REW</b>	0.5	km <sup>2</sup>			
<b>Área de contribución</b>	1631.6	km <sup>2</sup>			
<b>Coordenadas del centroide</b>	583039.1424	2303693.321			
	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Precipitación medida (mm)</b>	<b>Evaporación medida (mm)</b>	<b>Temperatura medida (°C)</b>	<b>Escorrentamiento (m3/s)</b>
01/01/2000	0	0	2.7	2.7	22.622
02/01/2000	86400	0	3.8	3.8	22.1095
03/01/2000	172800	0.9	3.1	3.1	21.6454
04/01/2000	259200	0	1.8	1.8	21.2437
05/01/2000	345600	0	3.2	3.2	20.8215
06/01/2000	432000	0	3.1	3.1	20.4245
07/01/2000	518400	0	2.9	2.9	20.0452
08/01/2000	604800	0	3.1	3.1	19.6792
09/01/2000	691200	0	2.9	2.9	19.3257
10/01/2000	777600	0	2.6	2.6	18.9856
11/01/2000	864000	0	2.8	2.8	18.6569
12/01/2000	950400	0	3.1	3.1	18.3385
13/01/2000	1036800	3.6	2.5	2.5	18.0304
14/01/2000	1123200	9.399999	1.4	1.4	18.2311
15/01/2000	1209600	7.1	1.2	1.2	18.1086
16/01/2000	1296000	5.1	2.4	2.4	17.7048
17/01/2000	1382400	3.5	2.9	2.9	17.4357
18/01/2000	1468800	0	2.8	2.8	17.2101
19/01/2000	1555200	0	3	3	16.8905
20/01/2000	1641600	0	3.4	3.4	16.63
21/01/2000	1728000	0	2.9	2.9	16.3844
22/01/2000	1814400	0	2.9	2.9	16.1466
23/01/2000	1900800	0	3	3	15.9149
24/01/2000	1987200	0.7	2.7	2.7	15.689
25/01/2000	2073600	0.1	3.5	3.5	15.4885
26/01/2000	2160000	0.1	2.6	2.6	15.2671
27/01/2000	2246400	0	4.1	4.1	15.0598
28/01/2000	2332800	2.2	3.1	3.1	14.8495
29/01/2000	2419200	0.9	2.5	2.5	14.7131
30/01/2000	2505600	0.1	2.4	2.4	14.5418
31/01/2000	2592000	0	2.9	2.9	14.3219
01/02/2000	2678400	0	2.7	2.7	14.1304
02/02/2000	2764800	3	2.5	2.5	13.9492
03/02/2000	2851200	0	1.7	1.7	13.8424
04/02/2000	2937600	0	3	3	13.6468
05/02/2000	3024000	0.4	2.4	2.4	13.4734
06/02/2000	3110400	0	3.1	3.1	13.3182
07/02/2000	3196800	0.4	2.9	2.9	13.1542
08/02/2000	3283200	0	2.3	2.3	13.0041
09/02/2000	3369600	0	2.9	2.9	12.8484
10/02/2000	3456000	0	3.8	3.8	12.6958
11/02/2000	3542400	0	4.9	4.9	12.547
12/02/2000	3628800	0	3.5	3.5	12.4009

## A2. Continuación...

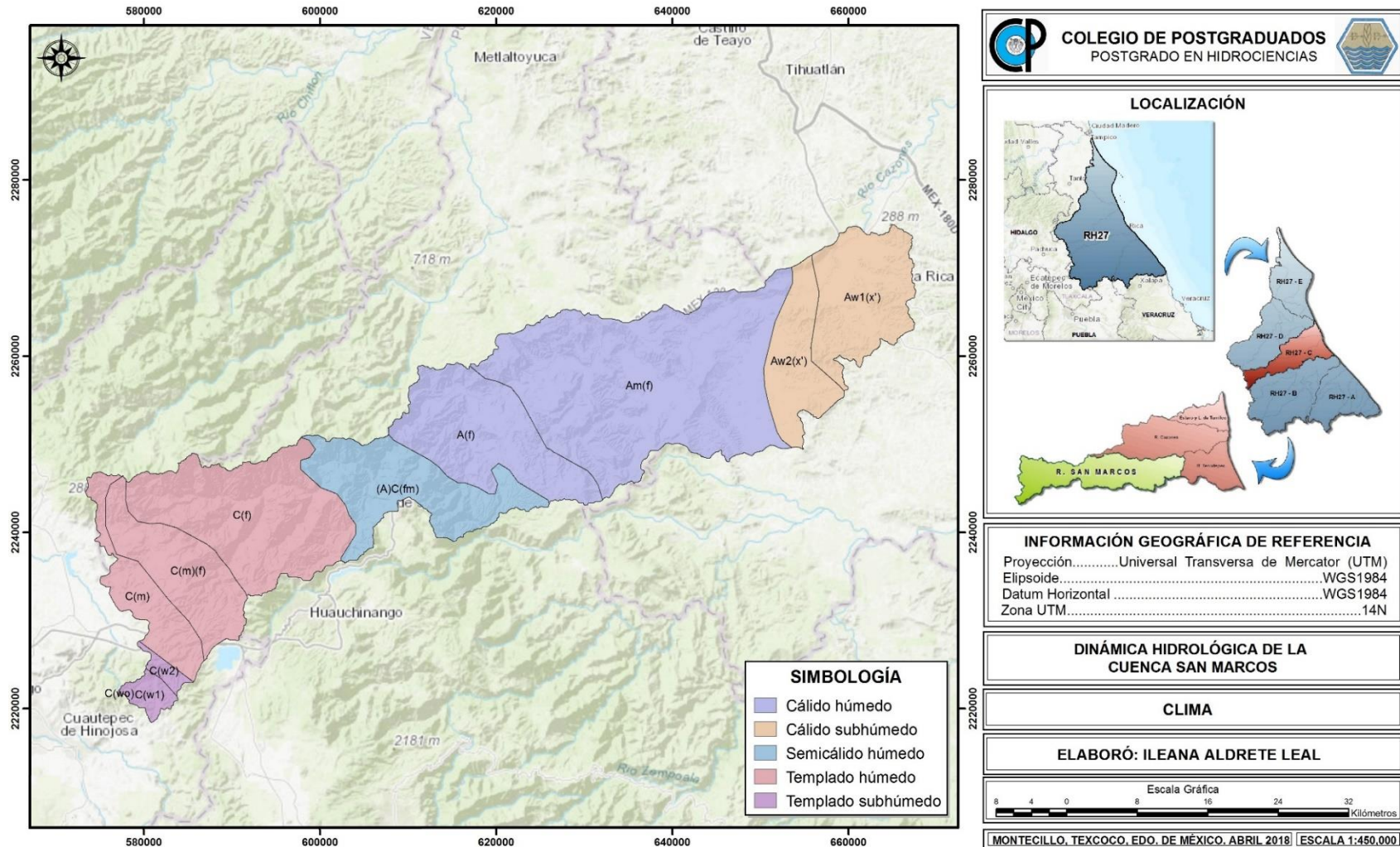
Fecha	Velocidad del cauce (m/s)	Ancho del cauce (m)	Profundidad del cauce (m)	Intercambio zonas r-o	Intercambio zonas r-s
01/01/2000	0	30.3675	0.6705	0.0242	0.0071
02/01/2000	0.0001	37.8769	0.8362	0.0207	0.007
03/01/2000	0.0001	37.6129	0.8304	0.0198	0.0068
04/01/2000	0.0001	37.3812	0.8253	0.0187	0.0067
05/01/2000	0.0001	37.1344	0.8199	0.0182	0.0066
06/01/2000	0.0001	36.8993	0.8147	0.0178	0.0064
07/01/2000	0.0001	36.6718	0.8096	0.0174	0.0063
08/01/2000	0	36.4495	0.8047	0.017	0.0061
09/01/2000	0	36.2322	0.7999	0.0166	0.006
10/01/2000	0	36.0205	0.7953	0.0162	0.0058
11/01/2000	0	35.8135	0.7907	0.0159	0.0057
12/01/2000	0	35.6107	0.7862	0.0156	0.0056
13/01/2000	0	35.4122	0.7818	0.0153	0.0055
14/01/2000	0	35.5473	0.7848	-0.0019	0.0057
15/01/2000	0	35.4637	0.783	0.0117	0.0065
16/01/2000	0	35.1997	0.7771	0.014	0.007
17/01/2000	0	35.0221	0.7732	0.0135	0.0074
18/01/2000	0	34.8722	0.7699	0.0123	0.0075
19/01/2000	0	34.6567	0.7652	0.0138	0.007
20/01/2000	0	34.4795	0.7612	0.0134	0.0068
21/01/2000	0	34.3107	0.7575	0.013	0.0066
22/01/2000	0	34.1456	0.7539	0.0128	0.0065
23/01/2000	0	33.9832	0.7503	0.0126	0.0063
24/01/2000	0	33.8232	0.7467	0.0125	0.0062
25/01/2000	0	33.68	0.7436	0.012	0.0061
26/01/2000	0	33.5203	0.7401	0.0121	0.006
27/01/2000	0	33.3695	0.7367	0.0118	0.0059
28/01/2000	0	33.2149	0.7333	0.0119	0.0057
29/01/2000	0	33.1142	0.7311	0.0109	0.0058
30/01/2000	0	32.9867	0.7283	0.0103	0.0058
31/01/2000	0	32.8207	0.7246	0.0115	0.0056
01/02/2000	0	32.6753	0.7214	0.0111	0.0055
02/02/2000	0	32.5365	0.7183	0.0109	0.0054
03/02/2000	0	32.4542	0.7165	0.0103	0.0056
04/02/2000	0	32.3022	0.7132	0.0099	0.0054
05/02/2000	0	32.166	0.7102	0.0104	0.0053
06/02/2000	0	32.0433	0.7075	0.0102	0.0052
07/02/2000	0	31.9126	0.7046	0.01	0.0051
08/02/2000	0	31.7919	0.7019	0.01	0.0051
09/02/2000	0	31.6659	0.6991	0.0097	0.005
10/02/2000	0	31.5412	0.6964	0.0098	0.0049
11/02/2000	0	31.4187	0.6937	0.0097	0.0048
12/02/2000	0	31.2975	0.691	0.0096	0.0047
13/02/2000	0	31.1768	0.6883	0.0095	0.0046
14/02/2000	0	31.0586	0.6857	0.0094	0.0045
15/02/2000	0	30.9409	0.6831	0.0093	0.0044
16/02/2000	0	30.8249	0.6806	0.0092	0.0043
17/02/2000	0	30.7101	0.678	0.0091	0.0042
18/02/2000	0	30.5959	0.6755	0.0091	0.0042
19/02/2000	0	30.487	0.6731	0.0089	0.0041



### A3. Mapa de Unidades REW de la cuenca San Marcos.

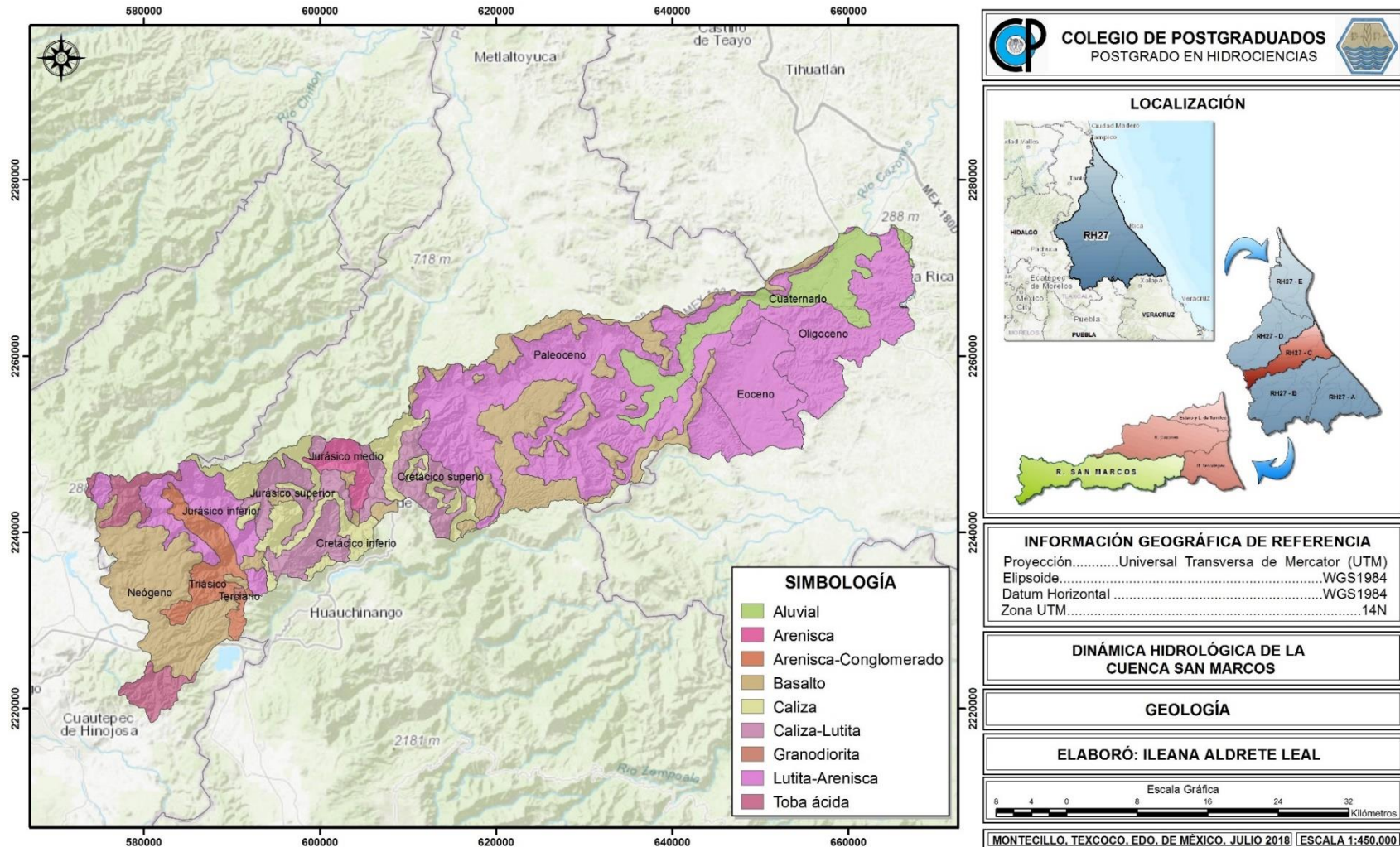


### A4. Mapa de clima de la cuenca San Marcos.

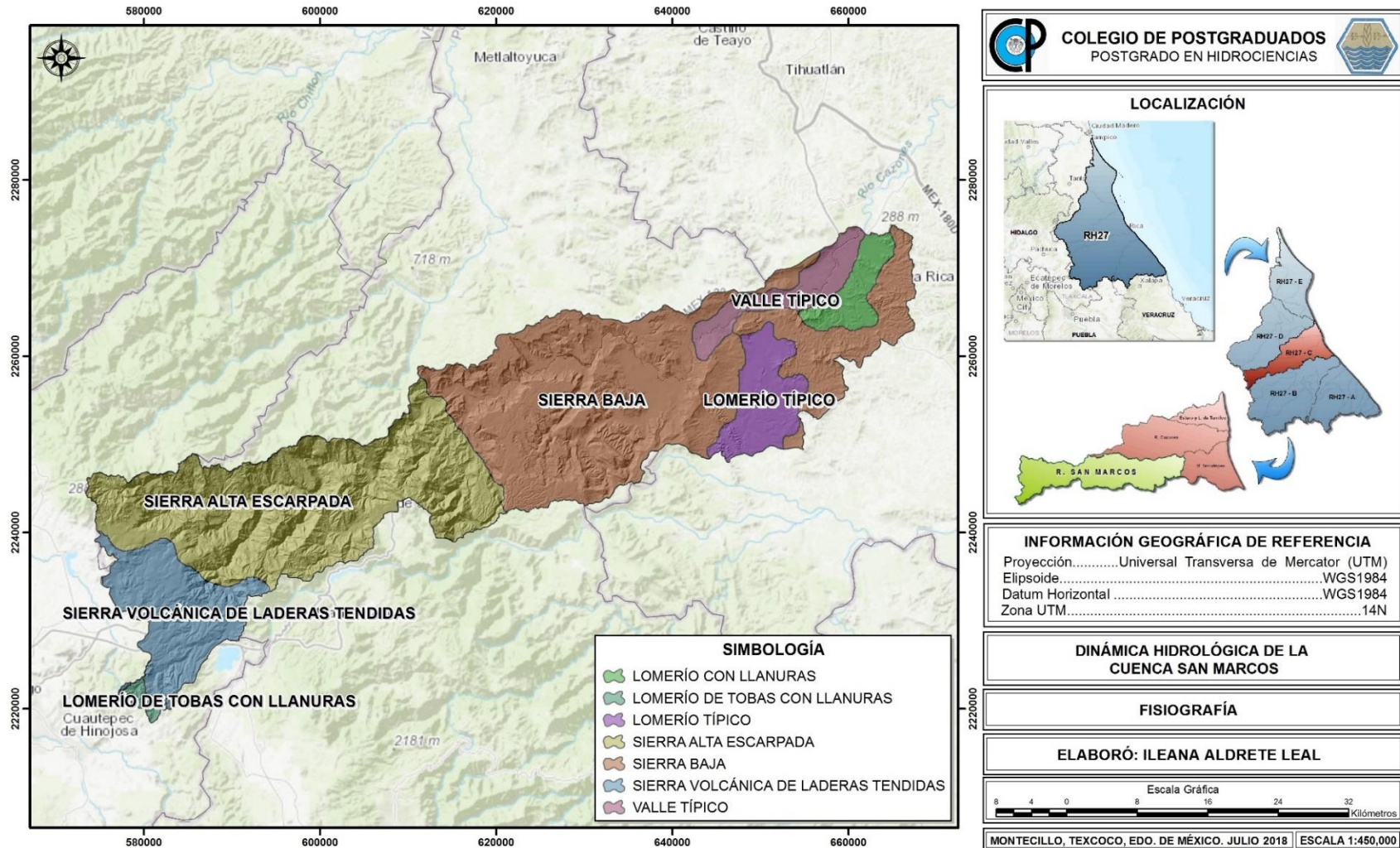




### A5. Mapa de geología de la cuenca San Marcos.

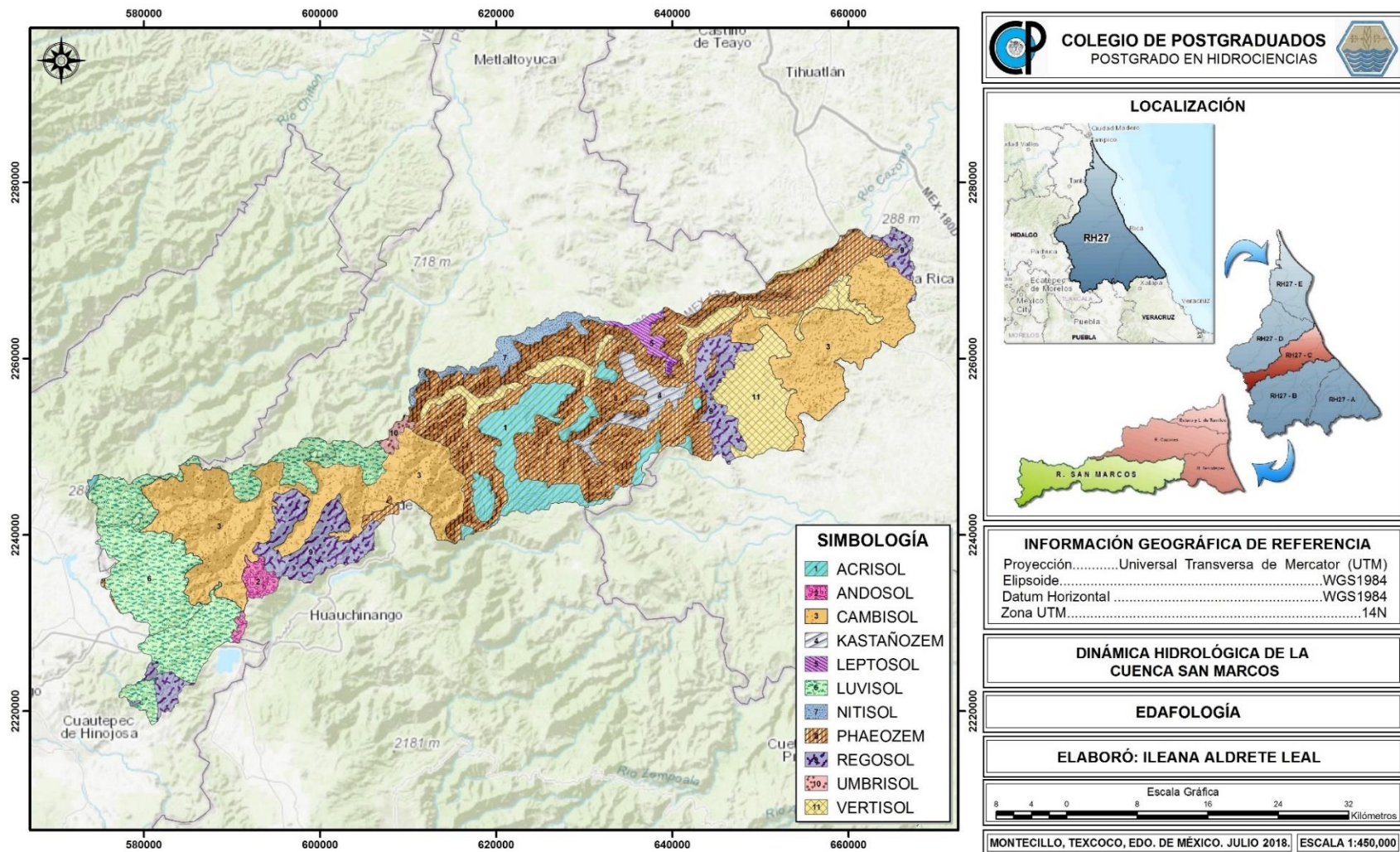


### A6. Mapa de fisiografía de la cuenca San Marcos.





### A7. Mapa de edafología de la cuenca San Marcos.



**A8. Mapa de uso del suelo de la cuenca San Marcos.**

