



Conciencia Tecnológica
ISSN: 1405-5597
contec@mail.ita.mx
Instituto Tecnológico de Aguascalientes
México

Análisis técnico hidrológico de la subcuenca del río Ajejela, Tlaxcala, México

Ramos-Aguilar, Rogelio; Máximo-Romero, Patricia; Galindo-López, Víctor; Ávila-Cruz, Máximo; Yáñez-Pérez, Gabriela; Covarrubias-Salvatori, Victoriano

Análisis técnico hidrológico de la subcuenca del río Ajejela, Tlaxcala, México

Conciencia Tecnológica, núm. 62, 2021

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94469878001>

Análisis técnico hidrológico de la subcuenca del río Ajejela, Tlaxcala, México

Technical hydrological analysis of the Ajejela river sub-basin, Tlaxcala, Mexico

Rogelio Ramos-Aguilar ¹
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
rogelio.ramos@correo.buap.mx

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94469878001>

Patricia Máximo-Romero ²
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Víctor Galindo-López ³
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Máximo Ávila-Cruz ⁴
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Gabriela Yáñez-Pérez ⁵
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Victoriano Covarrubias-Salvatori ⁶
Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla,
México

Recepción: 02 Agosto 2021
Aprobación: 03 Noviembre 2021

RESUMEN:

El trabajo presenta un análisis técnico de la subcuenca del río Ajejela que abarca los municipios de Tepetitla de Lardizábal, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Hueyotlipan, Sanctórum de Lázaro Cárdenas y Españaíta, todos pertenecientes al Estado de Tlaxcala. Se utilizaron para el estudio datos existentes de las estaciones hidrológicas y meteorológicas de Ixtacuixtla, Españaíta, Hueyotlipan, Tepetitla, Xocoyucan y Sanctórum. Los años que se analizaron abarcan de 1992 a 2020, donde se obtuvieron resultados importantes para poder realizar una proyección a futuro sobre la cantidad de agua disponible en la región hidrológica (subcuenca). Además, se realizó un balance hídrico para obtener entre otros datos la cantidad de precipitación, evapotranspiración

NOTAS DE AUTOR

- 1 Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Blvd. Valsequillo s/n, Cd Universitaria, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla, Pue. México.
- 2 Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Blvd. Valsequillo s/n, Cd Universitaria, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla, Pue. México.
- 3 Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Blvd. Valsequillo s/n, Cd Universitaria, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla, Pue. México.
- 4 Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Blvd. Valsequillo s/n, Cd Universitaria, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla, Pue. México.
- 5 Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Blvd. Valsequillo s/n, Cd Universitaria, Jardines de San Manuel, 72570 Puebla, Pue. México.
- 6 Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, México.

* Autor de correspondencia: rogelio.ramos@correo.buap.mx

y escurrimiento superficial que existe en la zona. El estudio se llevó a cabo para contribuir con datos técnicos para el área de protección civil en la prevención de desastres hidrológicos.

PALABRAS CLAVE: subcuenca, balance, métodos, gasto, cauce.

ABSTRACT:

This paper presents a technical analysis of the Ajejela river sub-basin, which includes the municipalities of Tepetitla de Lardizábal, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Hueyotlípán, Sanctórum de Lázaro Cárdenas and Españaíta, all belonging to the State of Tlaxcala. Existing data from the hydrological and meteorological stations of Ixtacuixtla, Españaíta, Hueyotlípán, Tepetitla, Xocoyucan and Sanctorum were used for the study. The years to be analyzed range from 1992 to 2020, where important results were obtained to be able to make a future projection on the amount of water available in the hydrological region (sub-basin). A water balance was also carried out to obtain, among other data, the amount of precipitation, evapotranspiration and surface runoff that exists in the area. The study was carried out in order to contribute technical data for the area of civil protection in the prevention of hydrological disasters.

KEYWORDS: sub-basin, balance, methods, flow, river bed.

INTRODUCCIÓN

El trabajo es un análisis técnico completo de la subcuenca del río Ajejela que abarca los años de 1992 a 2020. Los resultados tienen la finalidad de contar con datos hidrológicos suficientes y contribuir como Universidad a la prevención de desastres hidrológicos en la zona de estudio.

Uno de los objetivos fue determinar los gastos máximos probables para diferentes periodos de retorno, con base en registros de precipitación de las estaciones pluviométricas localizadas en la zona de estudio, dichos registros pertenecen a las alturas máximas de precipitación ocurridas durante una tormenta y su posible comportamiento a futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la delimitación de la subcuenca de manera digital se hizo uso de una carta topográfica en formato raster de la zona de estudio (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI); se realizó el trazo de la subcuenca georreferenciada mediante el software ArcView, además, se obtuvieron datos hidrológicos. La delimitación del parteaguas se realizó con criterios estrictamente topográficos e hidrográficos: se localizó el río principal, sus corrientes tributarias y la red de drenaje en dicha zona.

También se identificó y delinea la línea divisora de aguas a partir de la visualización de las curvas de nivel, el parteaguas se trazó mediante una poligonal uniendo los puntos de máxima altura que envolvieran tanto el cauce principal como sus tributarios hasta cerrar en el punto donde desemboca la corriente principal.

El cálculo del área, perímetro, cauce, hectáreas de polígonos y longitud de polilíneas se determinó mediante el software ArcView (figura 1).

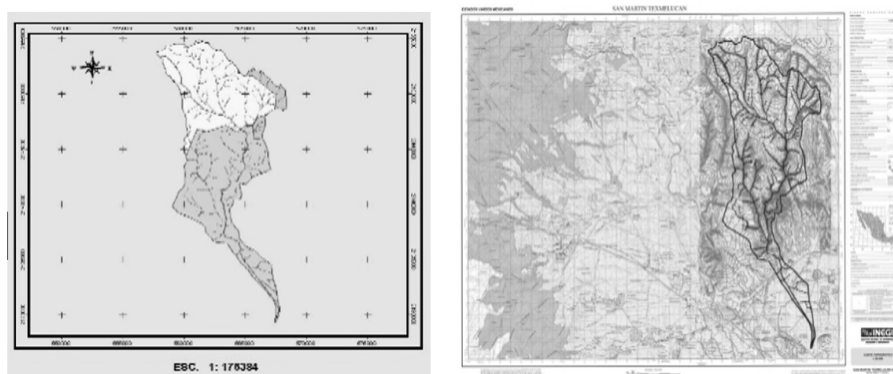


FIGURA 1

Delimitación del parteaguas de la región de la subcuenca del río Ajejela: área 113.472 km², perímetro 70.818 km y cauce principal del río 32.429 km, corriente del tipo perenne

A continuación, se presentan todos los desarrollos matemáticos para la zona de estudio.

Para calcular el índice o coeficiente de compacidad K_c de Gravelius (relación entre perímetros de la subcuenca y un círculo de igual), Llamas propone el siguiente modelo matemático:

$$K_c = 0.28 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \tag{1}$$

Donde: K_c = Índice de Gravelius, P = Perímetro de la subcuenca (km), A = Área de la subcuenca (km²). Primero se determina el perímetro y área de la subcuenca (con el software) y se sustituyen los datos en el modelo matemático:

$$K_c = 0.28 \left(\frac{70.818 \text{ km}}{\sqrt{113.472 \text{ km}^2}} \right) = 0.28 \left(\frac{70.818 \text{ km}}{10.652 \text{ km}} \right) = 0.28(6.648) = 1.862$$

$$\therefore K_c = K_{c3} = 1.862$$

Los rangos según la FAO de K_c son: K_{c1} entre 1 y 1.25, K_{c2} entre 1.25 y 1.5 y K_{c3} entre 1.5 y 1.75; el valor obtenido es de 1.862, sobrepasa la clase K_{c3} , esto indica que la subcuenca tiene una forma más alargada con relación a su ancho, por lo tanto, el agua escurre mayormente al cauce principal (río Ajejela).

Pendiente de la subcuenca del río Ajejela

Para este estudio se aplica el modelo de Alvord y se analiza primero la pendiente de su área tributaria:

$$S_1 \equiv \frac{D}{W_1} \tag{2}$$

Donde: S_1 = Pendiente media de la faja referente a esa curva de nivel, D = Desnivel entre las líneas medias, W_1 = Ancho de la faja.

Pero, W_1 es igual a:

$$W_1 = \frac{a_1}{l_1} \quad (3)$$

Siendo: a_1 = Área de la faja, l_1 = Longitud de la curva de nivel.

Por lo tanto, la pendiente promedio de la subcuenca se obtiene de la siguiente forma:

$$S = \frac{D}{A} (l_1 + l_2 + \dots + l_n) \quad (4)$$

Por lo que:

$$S_c = \frac{D * L}{A} \quad (5)$$

En donde: D = Desnivel constante entre curvas de nivel (km), A = Área de la subcuenca (km^2), L = Longitud total de las curvas de nivel, dentro de la subcuenca (km), S_c = Pendiente de la subcuenca.

Una vez conocida el área de la subcuenca, se procedió a determinar la longitud de cada una de las curvas a una equidistancia de 20 m, de la cota 2220 a la 2780 con un total de longitud de 941.34 m.

Sustituyendo los datos obtenidos, en la ecuación 5 se tiene:

$$S_c = \frac{0.020 \text{ km} \times 941.340 \text{ km}}{113.472 \text{ km}^2} = \frac{18.827 \text{ km}^2}{113.472 \text{ km}^2} \therefore S_c = 0.166 \cong 16.6 \%$$

El resultado muestra que la subcuenca tiene una pendiente media de 16.6 %.

Elevación de la subcuenca

La elevación media de la subcuenca se calcula como el promedio de las elevaciones de todas las intersecciones y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n EN_c}{N_c} \quad (6)$$

En donde: E_m = Elevación media de la subcuenca (msnm), EN_c = Elevación total de las intersecciones (msnm), N_c = Número total de intersecciones dentro de la subcuenca.

Los datos obtenidos se sustituyeron en la ecuación 6:

$$E_m = 142\,669 \frac{\text{msnm}}{57} \therefore E_m = 2502.965 \text{ msnm}$$

El resultado de la elevación media de la subcuenca tiene un valor de 2502.965 msnm.

Curva hipsométrica

La gráfica del relieve de la subcuenca (estudio de la variación de las elevaciones) se obtuvo con la relación de los datos de las columnas, donde se muestran en la columna 1 los intervalos de clasificación analizados, en la columna 2, el número de veces que las elevaciones quedaron comprendidas en dicho intervalo, en la columna 3 se muestran las frecuencias obtenidas de dividir los valores de la columna 2 entre el total. Mientras que en la columna 4 el valor de la columna 3 expresada en porcentaje y en la columna 5 la acumulación de dichos porcentajes (tabla 1).

TABLA 1
Relaciones área-elevación de la subcuenca del río Ajejela, Tlaxcala

Elevación (msnm)		n	n/57	n/57 %	n/57 % acumulado
2676	2740	1	0.0175	1.750	1.750
2613	2676	9	0.1579	15.790	17.540
2549	2613	13	0.2281	22.810	40.350
2485	2549	12	0.2105	21.050	61.400
2421	2485	7	0.1228	12.280	73.680
2358	2421	6	0.1053	10.530	84.210
2294	2358	6	0.1053	10.530	94.740
2230	2294	3	0.0526	5.260	100.00
Suma		57	1.0000	100.000	

Modelo de horton-strabler

Para el estudio se utilizó este modelo en el que se requiere de un plano de la subcuenca que incluya tanto corrientes perennes como intermitentes.

Esta característica se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$D_s = \frac{N_s}{A} \tag{7}$$

Donde: N_s = Número de corrientes de la subcuenca, A = Área total de la subcuenca (km²), D_s = Densidad de corriente (corriente/km²).

Para determinar la densidad de corriente, se calcularon 103 corrientes de orden 1, 27 corrientes de orden 2, 6 corrientes de orden 3, 2 corrientes de orden 4 y 1 corriente de orden 5, para un total de 139 corrientes.

Sustituyendo en (7) se tiene:

$$D_s = \frac{139 \text{ corriente}}{113.472 \text{ km}^2} = 1.225 \frac{\text{corriente}}{\text{km}^2} \therefore D_s = 1.225 \frac{\text{corriente}}{\text{km}^2}$$

La densidad de corriente en la subcuenca resultó tener un valor de 1.225 corriente/km².

Densidad de drenaje

Para obtener la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la subcuenca y su área total, se aplica el siguiente modelo matemático.

$$D_d = \frac{L}{A} \tag{8}$$

Donde: L = Longitud total de las corrientes perennes e intermitentes (km), D_d. = Densidad de drenaje (km/km²), A = Área total de la subcuenca (km²).

Para determinar la densidad de corrientes perennes e intermitentes, se obtuvieron 101.22 km de corrientes de orden 1, 31.07 km de corrientes de orden 2, 20.93 km de corrientes de orden 3, 15.26 km de corrientes de orden 4 y 10.79 km de corrientes de orden 5, para un total de 179.27 corrientes.

Aplicando el mismo modelo (8) se obtiene lo siguiente:



ESC. 1:130824

FIGURA 2

Perfil del río Ajejela, donde puede apreciarse que, en una longitud de 28,826 m, existe un desnivel del punto más alto al punto más bajo de 624 m

$$D_d = \frac{179.270 \text{ km}}{113.472 \text{ km}^2} = \therefore D_d = 1.580 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

El resultado obtenido es de 1.580 km/km², lo que indica que la zona de estudio tiene un régimen pluvial menor, pero con una resistencia del material litológico de gran magnitud.

Perfil del cauce principal

Para generar el perfil de la corriente principal se utilizó el módulo Surface del software ArcView, aplicando un modelo TIN (Red Irregular de Triángulos), dicho modelo fue creado a partir de las curvas de nivel de la subcuenca (figura 2).

Pendiente media del cauce principal

Para este estudio se tomó en cuenta una tormenta que pudiera contribuir a las variaciones de su pendiente y del cauce a lo largo de su longitud, se utilizó el Método simple donde la pendiente media es igual al desnivel entre los extremos inicial y final dividido entre la distancia horizontal de dicho tramo. El modelo matemático para calcularla es el siguiente:

$$S = \frac{E_n - E_d}{L} \quad (9)$$

Donde: S = Pendiente del tramo del cauce, E_n = Elevación del nacimiento del cauce (msnm), E_d = Elevación en la descarga del cauce (msnm), L = Desnivel entre los extremos del tramo del cauce (m).

Se determinó la elevación y descarga del cauce principal, obteniéndose.

$$S = \frac{2740 \text{ msnm} - 2220 \text{ msnm}}{32429 \text{ m}} = \frac{520 \text{ msnm}}{32429 \text{ m}} \therefore S = 1.6 \%$$

El resultado de la pendiente media del cauce principal en la subcuenca del río Ajejela es de 1.6 %.

Análisis de datos de precipitación

Para el estudio se analizaron los datos de precipitación máxima en 24 horas y 1 mes (en mm), registrados por las diferentes estaciones meteorológicas existentes en la subcuenca del río Ajejela, pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dentro de los años 1992-2020.

Precipitación máxima esperada

Para el ajuste de la obtención de las precipitaciones máximas, se aplicó el modelo Gumbel tipo I, obteniendo los diferentes periodos de precipitación de retorno:

$$PT = \beta - \left(\frac{\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{\alpha} \right)$$

$$\beta = ym(0.4506(Sy)) \quad \alpha = \frac{1.282}{Sy} \quad (10)$$

Donde: PT = Precipitación máxima esperada (mm), T = Periodo de retorno (años), ym = Promedio de la muestra, Sy = Desviación estándar de la muestra, α y β = Parámetros de la función de distribución, que equivalen a:

La función de distribución Gumbel tipo I, es un modelo de probabilidad y estadística empleado para determinar valores extremos a partir de un registro de observaciones.

Primero se calcularon los parámetros α y β para cada una de las estaciones meteorológicas localizadas en la subcuenca, con los datos obtenidos del promedio y desviación estándar de la intensidad de precipitación en 24 horas y 1 mes (tabla 2).

TABLA 2
Parámetros α y β

Estación	Intensidad	Variables		Formulas	Parámetro α	Parámetro β
		ym	Sy			
Ixtacuixtla	24 horas	45.790	18.770	$\alpha = \frac{1.282}{S_y}$ $\beta = ym - (0.4506(S_y))$	0.070	37.330
	1 mes	139.210	93.960		0.010	96.870
Españita	24 horas	62.510	39.400		0.030	44.760
	1 mes	254.330	187.550		0.010	169.820
Hueyotlipan	24 horas	51.170	24.430		0.050	40.160
	1 mes	152.980	91.590		0.010	111.710
Tepetitla	24 horas	50.230	20.880		0.060	40.830
	1 mes	153.430	99.820		0.010	108.450
Xocoyucan	24 horas	35.350	17.320		0.070	27.540
	1 mes	123.480	93.280		0.010	81.450
Sanctórum	24 horas	48.590	21.970		0.060	38.690
	1 mes	152.510	106.550		0.010	104.500

Posteriormente se obtuvieron los valores de precipitación máxima para los diferentes periodos de retorno de cada una de las estaciones meteorológicas (tabla 3).

TABLA 3
Precipitaciones máximas probables para diferentes periodos de retorno

Estación	Precipitación máxima (mm)							
	Periodos de retorno (T)							
	5 años		15 años		25 años		50 años	
	Precipitación máxima esperada (PT) en mm.		Precipitación máxima esperada (PT) en mm.		Precipitación máxima esperada (PT) en mm.		Precipitación máxima esperada (PT) en mm.	
24 horas	1 mes	24 horas	1 mes	24 horas	1 mes	24 horas	1 mes	
Ixtacuixtla	59.290	206.800	76.480	292.840	84.160	331.300	94.460	382.850
Españita	90.850	389.260	126.920	560.980	143.050	637.750	164.660	740.650
Hueyotlipan	68.740	218.870	91.100	302.740	101.100	340.230	114.510	390.480
Tepetitla	65.250	225.240	84.370	316.640	92.920	357.500	104.370	412.270
Xocoyucan	47.810	190.590	63.670	275.990	70.760	314.180	80.270	365.350
Sanctórum	64.400	229.160	84.510	326.710	93.500	370.330	105.550	428.780

Se realizaron las gráficas comparativas donde se aprecian las precipitaciones máximas esperadas de cada una de las 6 estaciones meteorológicas, que se localizan en la zona de estudio (figura 3).

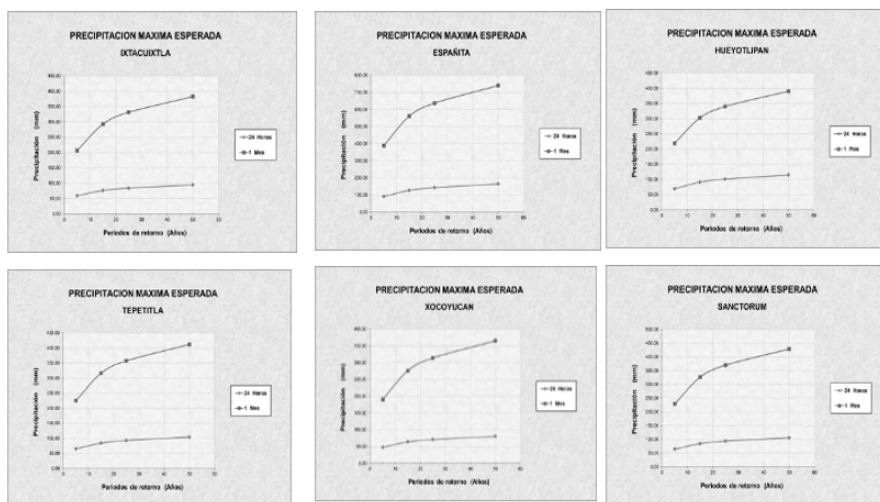


FIGURA 3

Precipitaciones máximas esperadas para 24 horas como 1 mes durante el periodo de 1992-2055 para diferentes períodos de retorno de las estaciones meteorológicas de: Ixtacuixtla, Españita, Hueyotlipan, Tepetitla, Xocoyucan y Sanctorum.

Tiempo de concentración

Se calculó el tiempo que tarda el agua en su recorrido entre dos puntos de la subcuenca (extremo superior y punto de medición), se aplicó el modelo de Kirpich, que involucra características físicas de las cuencas como la longitud y pendiente del cauce principal:

$$Tc = 0.0663 \times \left[\frac{L}{\sqrt{P}} \right]^{0.77} \tag{11}$$

Donde: Tc = Tiempo de concentración (hr), L = Longitud del cauce principal (km), P = Pendiente del cauce principal (Absoluto), sustituyendo los datos en el modelo y se obtiene:

$$Tc = 0.0663 \times \left[\frac{32.429km}{\sqrt{0.016}} \right]^{0.77} = 0.0663 \times \left[\frac{32.429km}{0.126} \right]^{0.77}$$

$$Tc = 0.0663 \times [256.374]^{0.77} = 0.0663 \times 71.587 \therefore Tc = 4.75 \text{ hr}$$

Intensidad máxima de precipitación

Para el estudio es importante determinar la capacidad erosiva de la lluvia, porcentaje de la lluvia, condiciones de suelo, pendiente y cobertura. Para determinar la intensidad máxima de precipitación, se utilizan los siguientes modelos matemáticos:

$$P = I \times t \quad I = \frac{k}{t^m} \tag{12}$$

$$\ln(k) = [3.1382 \times \ln P_{24}] - [2.1382 \times \ln PMES] \quad (13)$$

$$k = e^{\ln(k)} \quad (14)$$

$$m = \frac{\ln\left(30\left(\frac{P_{24}}{PMES}\right)\right)}{\ln 30} \quad (15)$$

Donde: P = Precipitación máxima (mm), I = Intensidad máxima (mm/min), k y m = Factores característicos de la zona, t = Duración de la precipitación (min), $\ln(k)$ = Logaritmo natural del factor característico k, PMES = Precipitación máxima en 1 mes (mm), P₂₄ = Precipitación máxima en 24 horas (mm).

En las tablas 4 y 5 se muestran las intensidades máximas de probables periodos de retorno.

TABLA 4
 Intensidades máximas probables para diferentes periodos de retorno de los factores característicos k y m, de las estaciones meteorológicas de Ixtacuixtla, Españita, Hueyotlipan, Tepetitla, Xocoyucan y Sanctorum.

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) IXTACUIXTLA				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	0.96	1.08	1.14	1.22
30	0.48	0.55	0.59	0.64
60	0.31	0.36	0.39	0.43
90	0.24	0.28	0.31	0.34
120	0.20	0.24	0.26	0.28
240	0.13	0.16	0.17	0.19
285	0.11	0.14	0.15	0.17
360	0.10	0.12	0.13	0.15
1440	0.04	0.05	0.06	0.07

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) ESPAÑITA				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	1.08	1.45	1.61	1.83
30	0.58	0.78	0.87	0.99
60	0.39	0.53	0.59	0.67
90	0.31	0.42	0.47	0.54
120	0.26	0.36	0.40	0.46
240	0.18	0.24	0.27	0.31
285	0.16	0.22	0.25	0.28
360	0.14	0.19	0.22	0.25
1440	0.06	0.09	0.10	0.11

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) HUEYOTLIPAN				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	1.27	1.58	1.72	1.91
30	0.61	0.77	0.85	0.94
60	0.39	0.49	0.54	0.61
90	0.30	0.38	0.42	0.47
120	0.25	0.32	0.35	0.39
240	0.16	0.20	0.22	0.25
285	0.14	0.18	0.20	0.22
360	0.12	0.16	0.17	0.19
1440	0.05	0.06	0.07	0.08

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) TEPETITLA				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	1.07	1.22	1.30	1.40
30	0.53	0.62	0.67	0.73
60	0.34	0.41	0.44	0.48
90	0.26	0.32	0.34	0.38
120	0.22	0.27	0.29	0.32
240	0.14	0.18	0.19	0.21
285	0.13	0.16	0.17	0.19
360	0.11	0.14	0.15	0.17
1440	0.05	0.06	0.06	0.07

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) XOCOYUCAN				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	0.63	0.75	0.80	0.88
30	0.33	0.40	0.43	0.48
60	0.22	0.27	0.29	0.32
90	0.17	0.21	0.23	0.26
120	0.15	0.18	0.20	0.22
240	0.10	0.12	0.13	0.15
285	0.09	0.11	0.12	0.14
360	0.08	0.10	0.11	0.12
1440	0.03	0.04	0.05	0.06

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) SANCTORUM				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	1.01	1.17	1.25	1.36
30	0.51	0.60	0.65	0.71
60	0.33	0.40	0.43	0.47
90	0.25	0.31	0.34	0.37
120	0.21	0.26	0.29	0.32
240	0.14	0.17	0.19	0.21
285	0.12	0.16	0.17	0.19
360	0.11	0.14	0.15	0.17
1440	0.04	0.06	0.06	0.07

Nota: La duración de precipitación de 285 minutos, corresponde a la subcuena.

Una vez calculada la intensidad máxima, se procede a determinar la precipitación máxima en cada una de las 6 estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio.

TABLA 5
Precipitación máxima para los diferentes periodos de retorno en las estaciones meteorológicas de Ixtacuixtla, Españaita, Hueyotlipan, Tepetitla, Xocoyucan y Sanctórum.

PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm) IXTACUIXTLA				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	9.60	10.80	11.40	12.20
30	14.30	16.59	17.69	19.21
60	18.45	21.81	23.39	25.55
90	21.42	25.60	27.54	30.18
120	23.80	28.68	30.93	33.98
240	30.70	37.70	40.89	45.19
285	32.70	40.35	43.82	48.50
360	35.63	44.25	48.14	53.40
1440	59.29	76.48	84.16	94.46

PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm) ESPAÑITA				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	10.80	14.50	16.10	18.30
30	17.34	23.38	26.10	29.74
60	23.33	31.66	35.39	40.40
90	27.75	37.79	42.29	48.33
120	31.38	42.85	47.99	54.89
240	42.21	58.01	65.09	74.57
285	45.43	62.54	70.19	80.46
360	50.21	69.26	77.78	89.21
1440	90.85	126.92	143.04	164.66

PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm) HUEYOTLIPAN				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	12.70	15.80	17.20	19.10
30	18.40	23.22	25.41	28.34
60	23.29	29.66	32.53	36.39
90	26.74	34.23	37.60	42.12
120	29.49	37.89	41.66	46.73
240	37.34	48.39	53.35	60.00
285	39.59	51.42	56.72	63.84
360	42.87	55.84	61.65	69.45
1440	68.74	91.10	101.10	114.50

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) TEPETITLA				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	10.70	12.20	13.00	14.00
30	15.93	18.72	20.05	21.85
60	20.50	24.52	26.38	28.91
90	23.77	28.70	30.98	34.06
120	26.39	32.10	34.72	38.26
240	33.97	42.03	45.69	50.61
285	36.17	44.94	48.91	54.25
360	39.38	49.21	53.65	59.62
1440	65.25	84.37	92.91	104.37

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) XOCOYUCAN				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	6.30	7.50	8.00	8.80
30	9.91	11.99	12.97	14.30
60	13.13	16.17	17.57	19.48
90	15.49	19.26	20.99	23.33
120	17.41	21.81	23.81	26.53
240	23.08	29.40	32.27	36.12
285	24.75	31.66	34.79	39.00
360	27.21	35.02	38.54	43.28
1440	47.81	63.67	70.76	80.26

INTENSIDAD MÁXIMA (mm) SANCTORUM				
Duración de la precipitación (t) en min	Periodo de retorno (T) en años			
	5	15	25	50
10	10.10	11.70	12.50	13.60
30	15.18	18.13	19.52	21.41
60	19.67	23.89	25.84	28.49
90	22.88	28.07	30.45	33.67
120	25.47	31.47	34.20	37.91
240	32.99	41.45	45.28	50.44
285	35.18	44.38	48.54	54.14
360	38.38	48.70	53.35	59.61
1440	64.39	84.51	93.50	105.55

Nota: La duración de precipitación de 285 minutos, corresponde a la subcuenca.

Coficiente de escurrimiento

Debido a que en la zona de estudio existen áreas de uso de suelo diferentes, se procedió a determinar el coeficiente de escurrimiento para cada una, tomando en cuenta su pendiente y textura.

Para calcular el coeficiente de escurrimiento medio se utilizó el siguiente modelo:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \tag{16}$$

Donde: C = Coeficiente de escurrimiento medio, C_i = Coeficiente de escurrimiento del área i, n = Número de áreas bajo análisis.

Sustituyendo los coeficientes de escurrimientos parciales en la ecuación 6, se tiene:

$$C = \frac{1}{3} (0.500 + 0.420 + 0.720) \therefore C = 0.550$$

Descargas máximas para diferentes periodos de retorno

El método que se utilizó para determinar las descargas máximas en la zona de estudio se fundamenta en las siguientes suposiciones: la duración de la tormenta coincide con el tiempo de escurrimiento; la capacidad de infiltración permanece constante con respecto al tiempo; la intensidad de precipitación es uniforme en toda la subcuenca.

Dicho procedimiento, está definido por medio de la siguiente fórmula:

$$Q_{max} = 0.278 \times C \times A \times \left(\frac{P}{t_c}\right) \quad (17)$$

Donde: Q_{max} = Descarga para una frecuencia (m^3/s), C = Coeficiente de escurrimiento, A = Área de la subcuenca (km^2), P = Precipitación máxima de una frecuencia determinada en un tiempo de concentración (mm), t_c = Tiempo de concentración (hr), 0.278 = Factor de conversión.

Se han determinado las variables de: coeficiente de escurrimiento (0.55), tiempo de concentración (4.75 hr) y el área de la subcuenca (113.472 km^2), con esos datos se calcularon los gastos máximos para los diferentes periodos de retorno para cada una de las 6 estaciones meteorológicas.

Modelo de balance hídrico

La ecuación del balance hídrico para la zona de estudio comprende la precipitación (P), masa de agua desde fuera (Q_{sI} y Q_{uI}), evapotranspiración (E), corrientes de agua superficial y subterránea considerada (Q_{sO} y Q_{uO}) y (v).

Por tanto, el balance hídrico en cualquier intervalo de tiempo está dado por el siguiente modelo:

$$P + Q_{sI} + Q_{uI} - E - Q_{sO} - Q_{uO} - \Delta S - v = 0 \quad (18)$$

En este estudio se descartan los valores de aguas subterráneas recibidas (Q_{uI}), salida de corriente de aguas subterráneas (Q_{uO}), las aportaciones superficiales (Q_{sI}) y el incremento o variación del volumen total de agua almacenada (ΔS). Por lo que el modelo del balance hídrico de una subcuenca es el siguiente:

$$P = R + E + v \quad (19)$$

Donde: P = Precipitación (mm), R = Escorrentía superficial (mm), E = Evapotranspiración (mm), v = Término de discrepancia.

Parámetros del modelo de balance hídrico para ajustar datos (faltantes)

Los parámetros utilizados para el estudio fueron la precipitación, evapotranspiración, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, déficit de saturación, temperatura, velocidad del viento y escurrimiento superficial.

El primer método que se aplicó es el método de la proporción normal:

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right] \quad (20)$$

Donde: P_x = Precipitación (faltante) de la estación en estudio "x", n = Número de estaciones pluviométricas con datos de la estación de estudio "x", N_x = Precipitación normal media anual de la estación en estudio "x", N_1, \dots, N_n = Precipitación normal media anual de las estaciones índices (1 a n), P_1, \dots, P_n = Precipitación de las estaciones índice (1 a n) durante el mismo periodo de tiempo por completar (del dato faltante).

La tabla 6 ejemplifica la estimación del año 2019 en la estación Sanctórum a partir de tres estaciones vecinas: Tepetitla, Ixtacuixtla y España.

TABLA 6
Ordenamiento de los datos para el cálculo del método de la proporción normal

Estimación de datos faltantes de la precipitación para el periodo 1992-2020				
	Estaciones índice que cuentan con un registro completo de precipitación			Estación en estudio X (Estación que le faltan registros de precipitación)
Año	Estación Tepetitla	Estación Ixtacuixtla	Estación Española	Estación Sanctórum
1992	704.300	819.800	666.700	681.300
1993	711.900	842.900	823.500	743.100
1994	521.200	638.700	959.000	779.300
1995	621.100	651.500	1017.200	939.100
1996	746.400	899.800	1135.200	755.900
1997	449.300	488.500	750.400	596.500
1998	501.700	487.400	971.500	635.700
1999	745.100	746.900	1408.200	813.900
2000	600.500	699.100	1542.000	573.800
2001	573.700	470.000	924.000	576.400
2002	633.200	634.900	991.200	730.300
2003	654.000	554.600	761.300	606.900
2004	410.800	500.200	743.000	
2005	696.500	535.700	1920.900	
2006	624.100	753.100	1932.200	
2007	976.000	929.100	1817.500	
2008	650.100	754.500	1054.500	
2009	685.500	688.000	1351.700	
2010	1024.400	959.600	1477.800	
2011	663.100	545.900	1355.000	604.200
2012	725.400	685.300	1478.800	748.800
2013	756.800	644.700	936.000	599.700
2014	697.900	570.400	873.500	719.500
2015	722.100	494.000	514.500	
2016	672.400	745.900	570.500	658.800
2017	656.700	570.300	436.200	656.700
2018	752.100	733.100	843.400	686.500
2019	771.900	712.500	1560.500	?
2020	627.900	690.800	598.800	612.600
Σ	19576.100	19447.200	31415.000	13719.000
Promedio	675,0	670,6	1083,3	686,0

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{686.000}{675.000} \right) 771.900 + \left(\frac{686.000}{670.600} \right) 712.500 + \left(\frac{686.000}{1083.300} \right) 1560.500 \right]$$

$$P_x = \frac{1}{3} [(1.016)771.900 + (1.023)712.500 + (0.663)1560.500]$$

$$P_x = \frac{1}{3} [784.378 + 712.500 + 988.137]$$

$$= \frac{1}{3} [2485.015] \therefore P_x = 828.300 \text{ mm}$$

Para estimar los años faltantes de la estación Sanctórum, solo basta identificar el dato carente y aplicar la ecuación 20, tomando como consideración que el promedio de la estación a analizar se va modificando conforme se calcula la precipitación faltante.

Los resultados de las estimaciones para las dos estaciones (Hueyotlipan y Xocoyucan) que requirieron completar su registro se muestran en la tabla 7.

TABLA 7
Registro pluviométrico completo de las estaciones meteorológicas existentes en la subcuenca del río Ajejela, Tlaxcala

Cálculo del análisis de la curva de doble masa "Tepetitla"								
Año	Estaciones base						Estación a controlar	
	Altura precipitación anual			Anual	Anual media	Anual media acumulada	Tepetitla	
	Tepetitla	Ixtacuixtla	Españita				Anual	Anual acumulada
1992	704.30	819.80	666.70	2190.80	730.30	730.30	704.30	704.300
1993	711.90	842.90	823.50	2378.30	792.80	1523.10	711.90	1416.20
1994	521.20	638.70	959.00	2118.90	706.30	2229.40	521.20	1937.40
1995	621.10	651.50	1017.20	2289.80	763.30	2992.70	621.10	2558.50
1996	746.40	899.80	1135.20	2781.40	927.10	3919.80	746.40	3304.90
1997	449.30	488.50	750.40	1688.20	562.70	4482.50	449.30	3754.20
1998	501.70	487.40	971.50	1960.60	653.50	5136.00	501.70	4255.90
1999	745.10	746.90	1408.20	2900.20	966.70	6102.70	745.10	5001.00
2000	600.50	699.10	1542.00	2841.60	947.20	7049.90	600.50	5601.50
2001	573.70	470.00	924.00	1967.70	655.90	7705.80	573.70	6175.20
2002	633.20	634.90	991.20	2259.30	753.10	8458.90	633.20	6808.40
2003	654.00	554.60	761.30	1969.90	656.60	9115.50	654.00	7462.40
2004	410.80	500.20	743.00	1654.00	551.30	9666.80	410.80	7873.20
2005	696.50	535.70	1920.90	3153.10	1051.00	10717.80	696.50	8569.70
2006	624.10	753.10	1932.20	3309.40	1103.10	11820.90	624.10	9193.80
2007	976.00	929.10	1817.50	3722.60	1240.90	13061.80	976.00	10169.80
2008	650.10	754.50	1054.50	2459.10	819.70	13881.50	650.10	10819.90
2009	685.50	688.00	1351.70	2725.20	908.40	14789.90	685.50	11505.40
2010	1024.40	959.60	1477.80	3461.80	1153.90	15943.80	1024.40	12529.80
2011	663.10	545.90	1355.00	2564.00	854.70	16798.50	663.10	13192.90
2012	725.40	685.30	1478.80	2889.50	963.20	17761.70	725.40	13918.30
2013	756.80	644.70	936.00	2337.50	779.20	18540.90	756.80	14675.10
2014	697.90	570.40	873.50	2141.80	713.90	19254.80	697.90	15373.00
2015	722.10	494.00	514.50	1730.60	576.90	19831.70	722.10	16095.10
2016	672.40	745.90	570.50	1988.80	662.90	20494.60	672.40	16767.50

Método de la curva de doble masa

El método aplicado para el estudio compara la precipitación anual acumulada en la estación por analizar con la precipitación media anual acumulada de un grupo de estaciones cercanas.

El desarrollo se realizó para las estaciones de Tepetitla Ixtacuixtla y Españita. Se presentan solo los datos obtenidos para la estación Tepetitla (tabla 8).

TABLA 8
Cálculo del análisis de la curva de doble masa, de las estaciones Tepetitla, Ixtacuixtla y Españaita, utilizando como estación de control a Sanctórum

Año	Estaciones base						Estación a controlar	
	Altura precipitación anual			Anual	Anual media	Anual media acumulada	Tepetitla	
	Tepetitla	Ixtacuixtla	Españaita				Anual	Anual acumulada
1992	704.30	819.80	666.70	2190.80	730.30	730.30	704.30	704.300
1993	711.90	842.90	823.50	2378.30	792.80	1523.10	711.90	1416.20
1994	521.20	638.70	959.00	2118.90	706.30	2229.40	521.20	1937.40
1995	621.10	651.50	1017.20	2289.80	763.30	2992.70	621.10	2558.50
1996	746.40	899.80	1133.20	2781.40	927.10	3919.80	746.40	3304.90
1997	449.30	483.50	750.40	1688.20	562.70	4482.50	449.30	3754.20
1998	501.70	487.40	871.50	1960.60	653.50	5136.00	501.70	4255.90
1999	745.10	746.90	1408.20	2900.20	966.70	6102.70	745.10	5001.00
2000	600.50	699.10	1542.00	2841.60	947.20	7049.90	600.50	5601.50
2001	573.70	470.00	924.00	1967.70	655.90	7705.80	573.70	6175.20
2002	633.20	634.90	991.20	2259.30	753.10	8458.90	633.20	6808.40
2003	654.00	554.60	761.30	1969.90	656.60	9115.50	654.00	7462.40
2004	410.80	500.20	743.00	1654.00	551.30	9666.80	410.80	7873.20
2005	696.50	535.70	1920.90	3153.10	1051.00	10717.80	696.50	8569.70
2006	624.10	753.10	1932.20	3309.40	1103.10	11820.90	624.10	9193.80
2007	976.00	929.10	1817.50	3722.60	1240.90	13061.80	976.00	10169.80
2008	650.10	754.50	1054.50	2459.10	819.70	13881.50	650.10	10819.90
2009	685.50	688.00	1351.70	2725.20	908.40	14789.90	685.50	11505.40
2010	1024.40	959.60	1477.80	3461.80	1153.90	15943.80	1024.40	12529.80
2011	663.10	545.90	1355.00	2564.00	854.70	16798.50	663.10	13192.90
2012	725.40	685.30	1478.80	2889.50	963.20	17761.70	725.40	13918.30
2013	756.80	644.70	936.00	2337.50	779.20	18540.90	756.80	14675.10
2014	697.90	570.40	873.50	2141.80	713.90	19254.80	697.90	15373.00
2015	722.10	494.00	514.50	1730.60	576.90	19831.70	722.10	16095.10
2016	672.40	745.90	570.50	1988.80	662.90	20494.60	672.40	16767.50
2017	656.70	570.30	436.20	1663.20	554.40	21049.00	656.70	17424.20
2018	752.10	733.10	843.40	2328.60	776.20	21825.20	752.10	18176.30
2019	771.90	712.50	1560.50	3044.90	1015.00	22840.20	771.90	18948.20
2020	627.90	690.80	598.80	1917.50	639.20	23479.40	627.90	19576.10

El modelo para corregir el método de la curva de doble masa es el siguiente:

$$F = \frac{P_c}{P_e} \tag{21}$$

Donde: F = Factor de corrección, P_c = Pendiente correcta, P_e = Pendiente errónea.

Precipitación media

Para el estudio se aplicó el método de las isoyetas:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n (h_{pi} \times A_i) \tag{22}$$

Donde \bar{h}_p = Precipitación media (mm), A_c = Área de la subcuenca (km²), h_{pi} = Altura de precipitación promedio entre las dos isoyetas adyacentes al análisis (mm), A_i = Área comprendida entre dos isoyetas consecutivas (km²), n = Número de tramos entre isoyetas.

La tabla 9 presenta los resultados obtenidos con el método de isoyetas.

TABLA 9
Ordenamiento de cálculo para usar el método de las isoyetas

Método de las isoyetas				
Isoyetas		Altura de precipitación en mm (h _{pi})	Área entre isoyetas en km ² (A _i)	h _{pi} x A _i
660	680	670	0.390	261.300
680	700	690	1.298	895.620
700	720	710	2.981	2116.510
720	740	730	5.195	3792.350
740	760	750	3.152	2364.000
760	780	770	4.916	3785.320
780	800	790	9.562	7553.980
800	820	810	10.708	8673.480
820	840	830	10.263	8518.290
840	860	850	9.109	7742.650
860	880	870	7.738	6732.060
880	900	890	6.941	6177.490
900	920	910	6.817	6203.470
920	940	930	7.474	6950.820
940	960	950	6.644	6311.800
960	980	970	5.667	5496.990
980	1000	990	4.769	4721.310
1000	1020	1010	3.944	3983.440
1020	1040	1030	3.253	3350.590
1040	1060	1050	1.947	2044.350
1060	1080	1070	0.702	751.140
1080	1080	1080	0.002	2.160
Suma			113.472	98429.120

Sustituyendo los valores de la tabla en el modelo 22, resulta lo siguiente:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{113.472 \text{ km}^2} \times (98429.120 \text{ mm} * \text{ km}^2) \therefore \bar{h}_p = 867.4 \text{ mm}$$

Análisis de la temperatura y deducción de datos

Para completar los registros de los años que faltan, se calcula con el siguiente modelo:

$$T_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) T_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) T_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) T_n \right] \quad (23)$$

Donde: T_x = Temperatura faltante de la estación "x" para el periodo de tiempo por completar, n = Número de estaciones con datos cercanos a la estación de estudio "x", N_1, \dots, N_n = Temperatura normal media anual de las estaciones índices (1 a n), T_x = Temperatura normal media anual de la estación "x", P_1, \dots, P_n = Temperatura de las estaciones índice (1 a n) durante el mismo periodo de tiempo por completar del dato faltante.

La tabla 10 presenta el cálculo de la temperatura media del año 2019 en la estación Hueyotlipan para ejemplificar el desarrollo.

TABLA 10
Ordenamiento del cálculo del método de la proporción normal

Estimación de datos faltantes de la temperatura media anual para el periodo 1992-2020				
Año	Estaciones índice que cuentan con registro completo de temperatura media anual			Estación en estudio "x" con falta de registros de temperatura
	Tepetitla	Ixtacuixtla	Españita	Hueyotlipan
1992	14.600	15.200	16.000	13.800
1993	14.600	15.300	18.300	13.700
1994	14.400	15.400	18.600	13.900
1995	15.000	15.600	15.900	14.300
1996	14.200	15.400	13.700	14.100
1997	14.900	16.000	14.400	15.000
1998	14.100	15.800	14.500	14.600
1999	13.900	15.400	14.000	14.100
2000	13.400	15.800	13.700	14.100
2001	14.700	15.700	14.300	14.100
2002	14.700	15.900	13.800	14.300
2003	14.600	15.500	7.500	14.200
2004	14.100	15.200	11.900	
2005	14.300	15.300	13.700	14.100
2006	14.500	15.300	14.000	
2007	14.100	15.000	13.400	
2008	14.300	15.200	14.400	
2009	14.700	15.700	13.700	
2010	14.900	15.600	13.600	
2011	14.100	11.600	14.300	14.400
2012	14.200	14.600	14.000	14.500
2013	15.700	15.100	14.800	14.300
2014	15.200	14.600	13.300	14.300
2015	14.500	14.500	14.200	
2016	14.300	15.400	13.800	13.000
2017	14.700	15.800	14.400	14.500
2018	14.900	16.000	14.300	14.400
2019	14.500	15.000	13.700	?
2020	14.500	14.600	13.700	14.200
Σ	420.600	441.500	409.900	297.900
Promedio	14.500	15.200	14.100	14.200

$$T_x = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{14.2}{14.5} \right) 14.5 + \left(\frac{14.2}{15.2} \right) 15.0 + \left(\frac{14.2}{14.1} \right) 13.7 \right]$$

$$T_x = \frac{1}{3} [(0.979)14.5 + (0.934)15.0 + (1.007)13.7]$$

$$T_x = \frac{1}{3} [14.200 + 14.013 + 13.797] = \frac{1}{3} [42.010] \therefore T_x = 14.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El análisis de la consistencia de datos por el método de la curva de doble masa se ejemplifica en la tabla 11.

TABLA 11
 Cálculo del análisis de la curva de doble masa, utilizando los datos de las estaciones termométricas de Tepetitla, Ixtacuixtla y Españaíta, y como estación de control Hueyotlipan

Cálculo del análisis de la curva de doble masa "Hueyotlipan"								
Año	Estaciones base						Estación a controlar	
	Temperatura media anual			Anual	Anual media	Anual media acumulada	Hueyotlipan	
	Tepetitla	Ixtacuixtla	Españaíta				Anual	Anual acumulada
1992	14.6	15.2	16.0	45.8	15.3	15.3	13.8	13.8
1993	14.6	15.3	18.3	48.2	16.1	31.4	13.7	27.5
1994	14.4	15.4	18.6	48.4	16.1	47.5	13.9	41.4
1995	15.0	15.6	15.9	46.5	15.5	63.0	14.3	55.7
1996	14.2	15.4	13.7	43.3	14.4	77.4	14.1	69.8
1997	14.9	16.0	14.4	45.3	15.1	92.5	15.0	84.8
1998	14.1	15.8	14.5	44.4	14.8	107.3	14.6	99.4
1999	13.9	15.4	14.0	43.3	14.4	121.7	14.1	113.5
2000	13.4	15.8	13.7	42.9	14.3	136.0	14.1	127.6
2001	14.7	15.7	14.3	44.7	14.9	150.9	14.1	141.7
2002	14.7	15.9	13.8	44.4	14.8	165.7	14.3	156.0
2003	14.6	15.5	7.5	37.6	12.5	178.2	14.2	170.2
2004	14.1	15.2	11.9	41.2	13.7	191.9	13.3	183.5
2005	14.3	15.3	13.7	43.3	14.4	206.3	14.1	197.6
2006	14.5	15.3	14.0	43.8	14.6	220.9	14.1	211.7
2007	14.1	15.0	13.4	42.5	14.2	235.1	13.7	225.4
2008	14.3	15.2	14.4	43.9	14.6	249.7	14.2	239.6
2009	14.7	15.7	13.7	44.1	14.7	264.4	14.2	253.8
2010	14.9	15.6	13.6	44.1	14.7	279.1	14.2	268.0
2011	14.1	11.6	14.3	40.0	13.3	292.4	14.4	282.4
2012	14.2	14.6	14.0	42.8	14.3	306.7	14.5	296.9
2013	15.7	15.1	14.8	45.6	15.2	321.9	14.3	311.2
2014	15.2	14.6	13.3	43.1	14.4	336.3	14.3	325.5
2015	14.5	14.5	14.2	43.2	14.4	350.7	14.0	339.5
2016	14.3	15.4	13.8	43.5	14.5	365.2	13.0	352.5
2017	14.7	15.8	14.4	44.9	15.0	380.2	14.5	367.0
2018	14.9	16.0	14.3	45.2	15.1	395.3	14.4	381.4
2019	14.5	15.0	13.7	43.2	14.4	409.7	14.0	395.4
2020	14.5	14.6	13.7	42.8	14.3	424.0	14.2	409.6

Temperatura media

El análisis se realizó mediante el método de isotermas siguiente:

$$\bar{t} = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n (t_i \times A_i) \tag{24}$$

Donde \bar{t} = Temperatura media en la subcuenca ($^{\circ}\text{C}$), A_c = Área de subcuenca (km^2), t_i = Temperatura promedio entre las dos isotermas adyacentes al análisis ($^{\circ}\text{C}$), A_i = Área comprendida entre dos isotermas consecutivas (km^2), n = Número de tramos entre isotermas.

A partir de la información completa se trazó el mapa de isotermas a nivel anual para el periodo de estudio (1992-2020) con el método de interpolación Kriging y los softwares Surfer y ArcView.

Sustituyendo los valores de la tabla 11 en el modelo 24 se tiene:

$$\bar{t} = \frac{1}{113.472\text{km}^2} \times (1639.435 \text{ }^{\circ}\text{C} * \text{km}^2) \therefore \bar{t} = 14.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Evapotranspiración

En el estudio se aplicó el modelo de Thornthwaite que es la relación empírica entre la ETP y la temperatura del aire:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^a$$

$$a = [(675 \times 10^{-9})(I^3) - (771 \times 10^{-7})(I^2)] + [(771 \times 10^{-7})(I) + 0.49239]$$

$$I = \sum i \quad i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \times L \quad (25)$$

Donde: $ETP_{\text{sin corregir}}$ = Evapotranspiración potencial mensual sin corregir (mm), t = Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$), a = Exponente empírico, I = Índice de calor anual, es la suma de 12 índices mensuales i , i = Índice mensual, ETP = Evapotranspiración potencial mensual corregida (mm), $ETP_{\text{sin corregir}}$ = Evapotranspiración potencial mensual sin corregir (mm), L = Factor de corrección.

Los resultados se presentan en la tabla 12:

TABLA 12
Índice de calor mensual

Índice de calor mensual													
Estaciones	Variable en °C	Meses del año											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Españaíta	<i>t</i>	12.0	13.8	15.2	16.1	16.8	15.7	14.9	14.7	14.6	14.3	13.7	12.0
	<i>i</i>	3.8	4.7	5.4	5.9	6.3	5.7	5.2	5.1	5.1	4.9	4.6	3.8
Hueyodipan	<i>t</i>	11.1	12.0	13.9	15.4	15.8	15.7	14.8	14.9	14.9	14.2	13.0	11.7
	<i>i</i>	3.3	3.8	4.7	5.5	5.7	5.7	5.2	5.2	5.2	4.9	4.2	3.6
Ixtacuixtla	<i>t</i>	11.7	12.9	15.0	16.8	17.7	17.7	16.8	16.9	16.7	15.6	13.7	12.2
	<i>i</i>	3.6	4.2	5.3	6.3	6.8	6.3	6.3	6.2	5.6	4.6	3.9	3.7
Sanctórum	<i>t</i>	11.2	12.4	14.0	15.5	15.7	15.2	14.5	14.5	14.2	13.3	12.4	11.7
	<i>i</i>	3.4	4.0	4.8	5.5	5.7	5.4	5.0	5.0	4.9	4.4	4.0	3.6
Tepetita	<i>t</i>	11.1	12.3	13.9	15.6	16.8	16.8	16.0	16.0	15.9	14.8	13.1	11.6
	<i>i</i>	3.3	3.9	4.7	5.6	6.3	6.3	5.8	5.8	5.8	5.2	4.3	3.6
Xocoyucan	<i>t</i>	11.3	12.7	14.8	16.4	17.4	17.7	16.7	16.7	16.8	15.8	13.4	11.9
	<i>i</i>	3.4	4.1	5.2	6.0	6.6	6.8	6.2	6.2	6.3	5.7	4.4	3.7

Estaciones	Índice de calor mensual (i) en °C												Índice de calor anual (I) en °C
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Españaíta	3.8	4.7	5.4	5.9	6.3	5.7	5.2	5.1	5.1	4.9	4.6	3.8	60.5
Hueyodipan	3.3	3.8	4.7	5.5	5.7	5.7	5.2	5.2	5.2	4.9	4.2	3.6	57.0
Ixtacuixtla	3.6	4.2	5.3	6.3	6.8	6.3	6.3	6.2	5.6	4.6	3.9	3.7	62.8
Sanctórum	3.4	4.0	4.8	5.5	5.7	5.4	5.0	5.0	4.9	4.4	4.0	3.6	55.7
Tepetita	3.3	3.9	4.7	5.6	6.3	6.3	5.8	5.8	5.8	5.2	4.3	3.6	60.6
Xocoyucan	3.4	4.1	5.2	6.0	6.6	6.8	6.2	6.2	6.3	5.7	4.4	3.7	64.6

Estaciones	Índice de calor anual (I) en °C	Exponente empirico (a)
Españaíta	60.5	1.4
Hueyodipan	57.0	1.4
Ixtacuixtla	62.8	1.5
Sanctórum	55.7	1.4
Tepetita	60.6	1.4
Xocoyucan	64.6	1.5

Se ejemplifica el cálculo de ETP sin corregir durante el mes de agosto según el método de Thornthwaite, en la estación meteorológica de Tepetita.

Datos: ETR sin corregir = ?, t = 16.0 °C, I = 60.6 °C, a = 1.4

$$ETR_{sin\ corregir} = 16 \left[\frac{10 \times t}{I} \right]^a = 16 \left[\frac{10 \times 16}{60.600} \right]^{1.4} = 16 \left[\frac{160}{60.600} \right]^{1.4}$$

$$ETR_{sin\ corregir} = 16 [2.600]^{1.4} = 16 \times 3.800 \therefore ETR_{sin\ corregir} = 61.000$$

Otro modelo que se utilizó en el desarrollo es el método de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad L = 300 + 25t + 0.500t^3 \quad (26)$$

Donde: ETR = Evapotranspiración real (mm), P = Precipitación (mm), L = Factor que varía con la temperatura media, t = Temperatura media (°C).

A continuación, se presenta como ejemplo el cálculo de L para la estación meteorológica de “Xocoyucan”. En consecuencia, se tiene lo siguiente:

Datos: L = ?, t = 15.0 °C

$$L = 300 + 25t + 0.050t^3 = 300 + (25 \times 15) + (0.0500 \times 15^3)$$

$$L = 300 + 375 + 0.750^3 = 300 + 375 + 0.420 \therefore L = 675.400$$

Aplicando el modelo de Turc para la estación de “Tepetitla” por ejemplo,

Datos: ETR_{Tepetitla} = ?, t = 14.1 °C, P = 1083.3 mm.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$ETR_{Tepetitla} = \frac{675.000}{\sqrt{0.9 + \frac{675.000^2}{814.900^2}}} = \frac{675.000}{\sqrt{0.9 + \frac{455625.000}{664062.000}}} = \frac{675.000}{\sqrt{0.900 + 0.700}}$$

$$ETR_{Tepetitla} = \frac{675.000}{\sqrt{1.600}} = \frac{675.000}{1.300} \therefore ETR_{Tepetitla} = 519.200 \text{ mm}$$

Caudal

Para determinar el gasto o caudal (cantidad de agua que lleva un río en un momento dado) que llega a un punto determinado, se aplicó el siguiente modelo:

$$Q = \frac{C \times I \times A_c}{360} \quad I = \frac{16\sqrt{F}}{t^{0.46}} \quad (27)$$

Donde: Q = Caudal (m³/s), I = Intensidad de la lluvia para una duración que es igual al tiempo de concentración (mm/hr), A_c = Área de la subcuenca (km²), C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional), F = Frecuencia de la presentación de la lluvia de máxima intensidad (años), t = Tiempo de duración que es igual al tiempo de concentración “tc” (min).

Para calcular el valor de la intensidad de la lluvia es necesario conocer el tiempo de concentración (tc) mismo que ya fue calculado (4.75 hr, es decir, 285 min):

$$I = \frac{16\sqrt{F}}{t^{0.46}} = \frac{16\sqrt{5}}{285^{0.46}} = \frac{16 \times 2.240}{14.47} = \frac{35.840}{14.470} \therefore I = 2.500 \text{ cm/hr}$$

Convirtiendo tenemos:

$$I = \frac{2.500 \text{ cm}}{1 \text{ hr}} \times \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} \quad \therefore I = 25 \text{ mm/hr}$$

El coeficiente de escurrimiento (0.55) y el área de a subcuena (113.472 km²), calculados previamente, se sustituyen en la ecuación 27:

$$Q = \frac{C \times I \times A_c}{360} = \frac{0.550 \times 25 \times 113.472}{360} = \frac{1560.240}{360} \quad \therefore Q = 4.330 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el cálculo del escurrimiento superficial se aplica el siguiente modelo:

$$R = \frac{31.536 \times Q}{A_c} \quad (28)$$

Donde: R = Escurrimiento superficial (mm), Q = Caudal (m³/s), A_c = Área de la subcuena (km²).

Una vez que ya fueron determinados los valores tanto del caudal como del área de la subcuena se sustituyen:

$$R = \frac{31.536 \times Q}{A_c} = \frac{31.536 \times 4.330}{113.472} = \frac{136.551}{113.472} \quad \therefore R = 1.200 \text{ mm}$$

Balance hídrico

Para calcular el balance hídrico que es la distribución de los recursos a nivel global, el modelo que se aplica es el siguiente:

$$R = P - ETR \quad (29)$$

Donde: R = Escurrimiento superficial para el periodo (mm), P = Precipitación media del periodo (mm), ETR = Evapotranspiración real del periodo (mm).

Sustituyendo:

$$R = P - ETR = 867.400 \text{ mm} - 583.100 \text{ mm} \quad \therefore R = 284.300 \text{ mm}$$

En la tabla 13 se muestra un resumen de los resultados.

TABLA 13
Resultado del balance hídrico de la subcuenca del río Ajejela

Resultados de balance hídrico de la subcuenca del río Ajejela para el periodo 1992-2020		
Parámetro	Valores	Unidades
Área	113.472	km ²
Precipitación	867.400	mm
Evapotranspiración real	583.100	mm
Escurrimiento superficial	284.300	mm
Caudal	4.330	m ³ /s

RESULTADOS

Para el trabajo, la precipitación media de la subcuenca del río es de 867.4 mm, la cual se distribuye en forma irregular tanto espacial como temporalmente. A nivel temporal se distinguen dos épocas climáticas bien diferenciadas, la época seca que abarca los meses de noviembre a abril y la época de lluvias de mayo a octubre.

Los datos de precipitación a partir del mes de noviembre muestran que se inicia el periodo de la época seca. Además, por ser un mes de transición entre el periodo seco y lluvioso, se presentan precipitaciones del orden de 11.5 a 20.7 mm en la zona norte de la subcuenca del río Ajejela donde se localizan las estaciones meteorológicas: Españaíta, Hueyotlipan y Sanctórum. Las menores cantidades de lluvia de 12.2 a 14.0 mm se localizan en la zona sur que corresponde a las estaciones meteorológicas: Ixtacuixtla, Tepetitla y Xocoyucan. A medida que avanza la época seca, es decir, en los meses de diciembre, enero y febrero, las precipitaciones se presentan en forma más aislada y son casi mínimas, menores de 9.9 mm mensuales, excepto en la zona de la estación meteorológica de Españaíta donde se registran lluvias mayores de 10.4 a 12.8 mm (tabla 14).

TABLA 14
Datos de precipitación de las 6 estaciones meteorológicas existentes en la subcuenca del río Ajejela

Estación	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Españaíta	12.8	10.4	20.5	39.8	97.9	176.1	193.6	199.3	208.8	101.9	20.7	11.3
Hueyotlipan	7.0	7.4	16.2	34.0	77.5	136.5	155.9	148.7	107.6	53.1	11.5	5.4
Ixtacuixtla	6.1	6.5	11.3	29.8	68.3	127.6	115.9	121.5	118.1	58.6	12.2	8.2
Sanctórum	5.0	9.9	13.7	37.1	71.8	126.8	131.3	138.6	106.8	54.8	15.2	6.0
Tepetitla	5.3	3.2	11.8	24.9	58.1	127.5	125.3	131.0	131.0	61.0	14.0	7.3
Xocoyucan	4.0	5.9	8.0	35.9	70.1	148.6	119.8	136.6	116.0	61.5	12.2	4.4

Es en el mes de mayo donde se presentan algunas lluvias y que se extienden hasta el mes de octubre, se puede ver que la zona de mayor precipitación es la zona que corresponde a las poblaciones de Españaíta, Hueyotlipan y Sanctórum. Las zonas que registran menores rangos de precipitación se encuentran en la parte baja de la región hidrográfica localizada en las poblaciones de Xocoyucan, Ixtacuixtla y Tepetitla.

Los meses más lluviosos de la subcuenca del río, son junio, julio, agosto, septiembre y octubre, de los cuales agosto es el mes más lluvioso, estas precipitaciones oscilan entre los 138.6 y 199.3 mm en las zonas de mayor precipitación, y de 121.5 a 136.6 mm en las de menor precipitación. El promedio anual en la subcuenca del río registra lluvias superiores a los 719.7 mm que se localizan en la zona norte, y de 670.6 a 7730.8 mm en la zona sur.

Con base en el desarrollo y cálculo de la temperatura media, durante el mes de marzo se registran las mayores temperaturas, con valores que fluctúan entre 15.7 y 16.8 °C localizadas en la zona norte de la

subcuenca del río Ajejela, donde se encuentran las estaciones meteorológicas: Españaíta, Hueyotlipan y Sanctórum. En la región sur, las estaciones meteorológicas Ixtacuixtla, Tepetitla y Xocoyucan, registraron valores que varían de 16.8 a 17.7 °C. Las temperaturas del mes más frío se presentan en enero cuando la temperatura media oscila entre los 11.1 a 12.0 °C en la zona norte y entre 11.1 a 11.7 en la región sur de la subcuenca del río (tabla 15).

TABLA 15
 Datos de temperatura media de las 6 estaciones meteorológicas existentes en la subcuenca del río Ajejela

Estación	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Españaíta	12.0	13.8	15.2	16.1	16.8	15.7	14.9	14.7	14.6	14.3	13.7	12.0
Hueyotlipan	11.1	12.0	13.9	15.4	15.8	15.7	14.8	14.9	14.9	14.2	13.0	11.7
Ixtacuixtla	11.7	12.9	15.0	16.8	17.7	17.7	16.8	16.9	16.7	15.6	13.7	12.2
Sanctórum	11.2	12.4	14.0	15.5	15.7	15.2	14.5	14.5	14.2	13.3	12.4	11.7
Tepetitla	11.1	12.3	13.9	15.6	16.8	16.8	16.0	16.0	15.9	14.8	13.1	11.6
Xocoyucan	11.3	12.7	14.8	16.4	17.4	17.7	16.7	16.7	16.8	15.8	13.4	11.9

Los resultados para la zona norte de la subcuenca, respecto a la evapotranspiración real, arroja un rango de 553.6 a 637.2 mm, el valor promedio de evapotranspiración real anual de la subcuenca del río, es de 583.1 mm.

El análisis del escurrimiento superficial de la zona de estudio da valores que fluctúan entre 111.8 a 168.6 mm localizados en las poblaciones de: Ixtacuixtla, Hueyotlipan, Sanctórum, Tepetitla y Xocoyucan; mientras que en la zona norte donde se localiza la población de Españaíta, el escurrimiento superficial tiene un valor de 446.8 mm.

Se observa que al considerar el periodo de los años 1992-2020 el comportamiento de la subcuenca del río, presenta una precipitación media de 867.4 mm y una evapotranspiración real de 583.1 mm (tabla 16).

TABLA 16
 Resultados del balance hídrico de la subcuenca del río Ajejela

Parámetro	Valores	Unidades
Precipitación	867.400	mm
Evapotranspiración real	583.100	mm
Escurrimiento superficial	284.300	mm

CONCLUSIONES

Este trabajo cuanta con datos técnicos actualizados del balance hídrico de la subcuenca del río Ajejela, en el estado de Tlaxcala que permiten contribuir a la toma de decisiones en el área de prevención de riesgos hidrológicos.

Los resultados del análisis de precipitación indican que el mes más lluvioso es agosto, con valores que oscilan entre los 121.5 y 199.3 mm, y el periodo con menor lluvia corresponde a los meses de noviembre-abril, siendo febrero el mes más seco de la época con precipitaciones que varían de 3.2 a 10.4 mm.

La región norte de la subcuenca del río (comprende las poblaciones de Españaíta, Hueyotlipan y Sanctórum), presenta valores altos de precipitación media anual entre los 719.7 y 1083.3 mm, así como,

valores bajos de temperatura media anual entre los 3.4 a 14.1 °C y valores altos en la evapotranspiración real media anual entre los 553.6 y 637.2 mm.

Para la zona sur de la subcuenca del río Ajejela (abarca las poblaciones de Ixtacuixtla, Tepetitla y Xocoyucan) los valores más bajos de precipitación media anual oscilan entre los 670.6 a 730.8 mm, así como de evapotranspiración real media anual que fluctúan entre los 519.2 y 562.2 mm, los valores más altos de temperatura media anual oscilan entre 14.5 y 15.0 °C.

El comportamiento del régimen térmico en la subcuenca analizada es variable en su distribución espacial y temporal, se registran en el mes de marzo las mayores temperaturas medias anuales, las cuales, oscilan entre 15.7 y 17.7 °C, en tanto que las menores temperaturas ocurren en el mes de enero con valores de 11.1 a 12.0 °C.

Considerando los resultados obtenidos en este trabajo, se debe tomar en cuenta que durante la época de lluvias (mayo a octubre), las poblaciones de Españaíta, Sanctórum y Hueyotlipan, que se localizan en las partes más altas de la subcuenca del río Ajejela, donde la precipitación es elevada, debe existir por lo menos, una vez al año el desazolve del caudal del río para evitar taponamientos de basura, lo cual sería un gran riesgo para la población, ya que provocaría un desbordamiento y por tanto inundaciones.

El riesgo más importante se presenta en el periodo lluvioso durante los meses de junio-octubre para las poblaciones de Españaíta, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros y Hueyotlipan. Si estos resultados se aplican al desarrollo de la agricultura de temporal, se pueden implementar técnicas de rotación de cultivos, para que de esta manera exista un mejor aprovechamiento del recurso hídrico y la protección de las características del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bai, P., Liu, X., Liang, K., y Liu, C., (2015), Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *Journal of hydrology*, 529, 1030-1040.
- [2] Dile, Y. T., R. Srinivasan, (2014), Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data scarce watersheds: an application in the Blue. *Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), 1226-1241.
- [3] Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., y Srinivasan, R., (2014), Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 1-8.
- [4] Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D., y Fernández, J., (2012), Development and analysis of a 50 - year high - resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1), 74-85.
- [5] Jung, M., Kim, H., Mallari, K. J. B., Pak, G., y Yoon, J., (2015), Analysis of effects of climate change on runoff in an urban drainage system: a case study from Seoul, Korea. *Water Science and Technology*, 71(5), 653-660.
- [6] Narsimlu, B., Gosain, A. K., y Chahar, B. R., (2013), Assessment of future climate change impacts on water resources of upper sind river basin, India using SWAT model. *Water resources management*, 27(10), 3647-3662.
- [7] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Galindo López, V., Ávila Cruz, M., Yáñez Pérez, G., Márquez Máximo, R., & Covarrubias Salvatori, V. (2021). Análisis técnico geoestadístico de los ríos Atoyac y Alseseca que atraviesan la ciudad de Puebla, México. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (119), 5-22.
- [8] Ramos, R., Máximo, P., Soto, S., Alcántara, S. y Pérez, J., (2013), Analysis of the Meteorological Variables for Puebla City 2011-2012 Applying the Modeling Ion Wavelets in a Hypothetical Manner, *Journal Atmospheric and Climate Sciences, China*, vol. (3) pp. 450-458.
- [9] Ramos Pérez, O., (2013), Tesis Balance hídrico de la subcuenca del río Ajejela, en el estado de Tlaxcala.
- [10] Rawat, K. S., y Mishra, A. K. E., (2016), Evaluation of relief aspects morphometric parameters derived from different sources of DEMs and its effects over time of concentration of runoff (TC). *Earth Science Informatics*, 9(4), 409-424.

- [11] Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., y Chiogna, G., (2016), Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige River basin (Italy). *Science of The Total Environment*, 573, 66-82.
- [12] Xu, C. Y., y Singh, V. P. (2014), Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613-5623.