



Water balance of La Yesca municipality, Nayarit, Mexico

El balance hídrico en el municipio de La Yesca, Nayarit, México

Gómez-Reyes, E.¹, Ponce-Palafox, J.T.^{2*}, Arredondo-Figueroa, J.L.³,
Castillo-Vargasmachuca, S.², Benítez-Valle, A.², Ramírez-León, H.⁴.

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. División de CBI.

²Universidad Autónoma de Nayarit, Lab. Bioingeniería Costera. Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera y Centro Multidisciplinario de Bahía de Banderas C.P. 63155. Nayarit, México.

³Universidad Autónoma de Aguascalientes. Posta Zootécnica, Jesús María, Aguascalientes.

⁴Instituto Mexicano del Petróleo. México, D.F.

ABSTRACT

The purpose of this study was to calculate the water balance components in La Yesca municipality, Nayarit, Mexico. Methodology was used to obtain the water balance components in surface river basins, where the choice and application of algorithms to determine the volumes of water that do not have gauging depend on the type of statistical and geographical information available. The results of the estimates of water balance components in La Yesca municipality show that a water volume of about 114.856 m³ s⁻¹ is precipitated, from it the 88 % (101.141 m³ s⁻¹) evapotranspires, a lower portion recharges the underlying aquifers (3.019 m³ s⁻¹) and the rest runs off at about 10,696 m³ s⁻¹; from these runoffs, approximately 0.026 m³ s⁻¹ is used mainly for public use. Therefore we can say that the most important source of water supply of La Yesca municipality is formed by the flows of superficial water exploitation. In addition, there is an order import of 118.099 m³ s⁻¹ coming from the Santiago and Bolaños Rivers. The annual extraction of groundwater belongs to order 0.004 m³ s⁻¹. In the basin, 0.030 m³ s⁻¹ of water are used, from which 0.026 m³ s⁻¹ correspond to volumes of public use; the rest (0.004 m³ s⁻¹) are used in agriculture and aquaculture.

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: August 22th 2014.

Accepted/Aceptado: November 12th 2014.

RESUMEN

La finalidad del presente trabajo fue calcular las componentes del balance hídrico en el municipio de La Yesca, Nayarit, México. Se utilizó una metodología para obtener las componentes del balance hídrico en cuencas hidrográficas superficiales, donde la elección y aplicación de los algoritmos para determinar los volúmenes de agua que no cuentan con aforos dependen del tipo de información estadística y geográfica disponible. Los resultados de las estimaciones de las componentes del balance hídrico en el municipio de La Yesca, muestran que se precipita un volumen de agua del orden de 114.856 m³ s⁻¹, de éste, se evapotranspira el 88 % (101.141 m³ s⁻¹), una porción menor recarga el acuífero subyacente (3.019 m³ s⁻¹) y el resto escurre superficialmente en alrededor de 10.696 m³ s⁻¹; de estos escurrimientos se aprovecha aproximadamente 0.026 m³ s⁻¹ para su uso público principalmente. Por esto se puede decir que la fuente más importante de abastecimiento de agua del municipio de La Yesca, la constituye los caudales de los aprovechamientos de agua superficial. Además de que se cuenta con una importación del orden de 118.099 m³ s⁻¹ provenientes de los ríos Santiago y Bolaños. La extracción anual de agua subterránea es del orden de 0.004 m³ s⁻¹. En la cuenca se utilizan 0.030 m³ s⁻¹ de agua, de los cuales 0.026 m³ s⁻¹ corresponden a volúmenes de uso público; el resto (0.004 m³ s⁻¹) son de uso agrícola y acuícola.

*Corresponding Author:

Ponce-Palafox, J.T. Universidad Autónoma de Nayarit, Lab. Bioingeniería Costera. Escuela Nacional de Ingeniería Pesquera y Centro Multidisciplinario de Bahía de Banderas C.P. 63155. Nayarit, México. Phone: +52(311)133 0418. E-mail: jesus.ponce@usa.net

KEY WORDS

Basin, water balance, La Yesca, Río Santiago, Río Bolaños.

PALABRAS CLAVE

Cuencas, balance agua, La Yesca, Río Santiago, Río Bolaños.

Introduction

In most of the mountain zones in the State of Nayarit, Mexico, water constitutes a scarce resource which availability is essential for the social and economic development. Water balance signifies a basic tool to estimate water availability, relevant elements that operate the mechanic system of the basin and its modifications by influence of antropogenic activities. Knowing the structure of the water balance of both superficial and underground basins is fundamental to obtain a rational use of resources of water in space and time, as well as to improve their control and redistribution; for example: basin transfers, flood control, among others (UNESCO, 1981).

The calculus of the water balance consists in quantifying and summing up the incoming and outgoing flows of the basin, as well as those of consumption and return flows that occur in the interior, in order to obtain water volume variation during the interval when the flows are quantified. Some components of the water balance are not measured but estimated, such as the ones associated with hydrological processes (rain, evapotranspiration, runoffs and infiltration). Therefore, water balance constitutes a very valuable instrument for planning and decision making to preserve water. La Yesca municipality has a temperature between 14°C to 28°C, with different types of climate. Sub-humid mild weather is present in the 74 % of the municipality, covering localities of La Yesca, Huajimic, La Manga, Puente de Camotlan and Mesa del Tirador. Sub-humid warm weather is present in 16 % of the area of study in the localities of La Ciénega, Tatepuzco and Palmillas, and semi-dry hot weather with 10 % in the region of Apozolco. Mean annual precipitation in the area of study (Figure 1) is in the interval between 600 to 1,000 mm.

In the area of study there are four basins (Figure 2) and nine sub-basins (Table 1) which correspond to the hydrological region Lerma-Santiago and it covers the basins of the rivers Bolaños (21 %), Huaynamota (45 %), Santiago–Aguamilpa (33 %) and Santiago-Guadalajara (1 %).

Introducción

En la mayoría de las zonas de montaña del estado de Nayarit el agua constituye un recurso escaso cuya disponibilidad resulta esencial para el desarrollo económico y social. El balance hídrico constituye una herramienta básica para estimar la disponibilidad de agua, los elementos relevantes que rigen el sistema hidráulico de la cuenca y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. El conocimiento de la estructura del balance hídrico de cuencas superficiales y cuencas subterráneas, es fundamental para conseguir un uso racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo, así como para mejorar el control y redistribución de los mismos; por ejemplo: trasvases de cuencas, control de máximas crecidas, entre otras (UNESCO, 1981).

El cálculo del balance hídrico consiste en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida de la cuenca, así como aquéllos de consumo y retorno que ocurren en su interior, para obtener la variación del volumen de agua durante el intervalo en el que se cuantifican los flujos. Algunos de los componentes del balance hídrico no se miden, sino que se estiman, como los asociados a los procesos hidrológicos (lluvia, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración). Por lo que el balance hídrico constituye un instrumento muy valioso para la planeación y toma de decisiones para la preservación del agua. El municipio de La Yesca tiene una temperatura entre los 14°C a 28°C, con diferentes tipos de climas. El clima templado subhúmedo se presenta en el 74 % del municipio abarcando las localidades de La Yesca, Huajimic, La Manga, Puente de Camotlán y Mesa del Tirador. Cálido subhúmedo con el 16 % del área de estudio en las localidades de La Ciénega, Tatepuzco, Palmillas y Semisecos muy cálido con el 10 % por la región de Apozolco. La precipitación anual media en el área de estudio (Figura 1) está en el intervalo de los 600 a los 1,000 mm.

En el área de estudio se encuentran cuatro cuencas (Figura 2) y nueve subcuencas (Tabla 1), estas corresponden a la región hidrológica Lerma-Santiago y comprende las cuencas de los ríos Bolaños (21 %), Huaynamota (45 %), Santiago–Aguamilpa (33 %) y Santiago-Guadalajara (1 %).

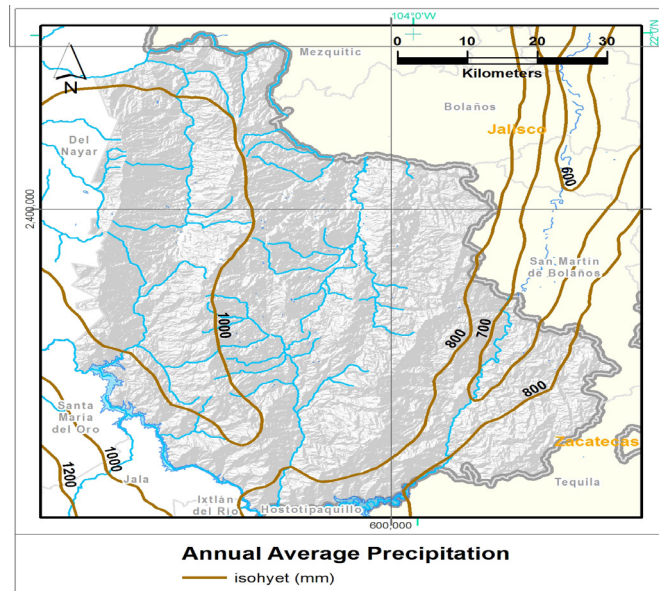


Figure 1. Precipitation of La Yesca municipality.

Source: Cartographic modelling, CENITT-UAN 2013, based on the information from the National Continuum of Geographic Data Gathering from the Climate, Total Annual Precipitation and Mean Annual Temperatures Chart scale 1:1'000,000, series I from INEGI (2010).

Figura 1. Precipitación del municipio de La Yesca.

Fuente: Modelación cartográfica, CENITT-UAN 2013, con base en la información del Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de las Cartas de Climas, Precipitación Total Anual y Temperaturas Medias Anuales escala 1:1'000,000, serie I de INEGI (2010).

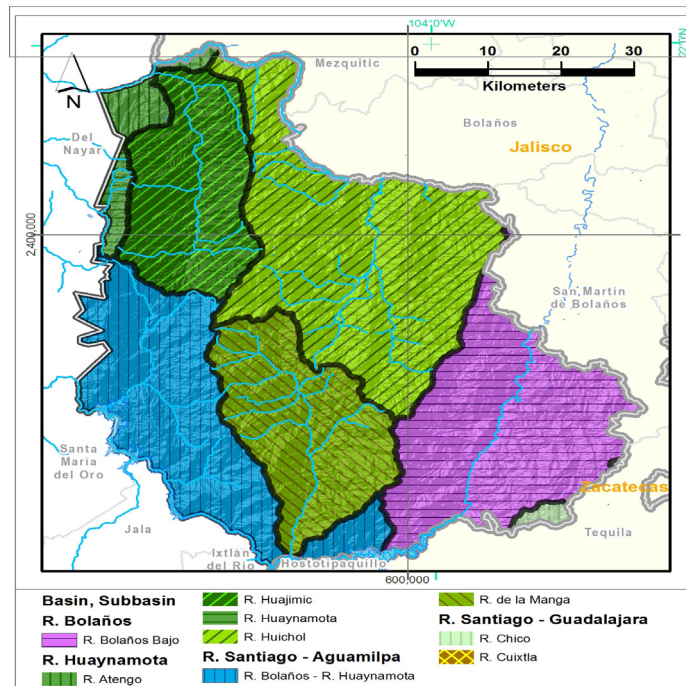


Figure 2. Percentage distribution of basins and sub-basins of La Yesca municipality.

Source: Cartographic modelling, CENITT-UAN 2013, based on the information from the National Continuum of Data Gathering from the Superficial Hydrological Chart. scale 1:250,000, I from INEGI (2010).

Figura 2. Distribución porcentual de cuencas y subcuencas del municipio de La Yesca.

Fuente: Modelación cartográfica, CENITT-UAN 2013, con base en la información del Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Hidrología Superficial escala 1:250,000 de INEGI (2010).

Table 1.
Percentage distribution of basins and sub-basins in La Yesca municipality

Tabla 1.
Distribución porcentual de cuencas y subcuencas en el municipio de La Yesca.

Basins	Sub-basins	(%)
Río Bolaños		21
	Río. Bolaños Bajo	21
Río. Huaynamota		45
	Río. Atengo	2
	Río. Huajimic	13
	Río. Huaynamota	2
	Río. Huichol	28
Río. Santiago - Aguamilpa		33
	Río. Bolaños - Río. Huaynamota	18
	Río. de la Manga	15
Río Santiago - Guadalajara		1
	Río. Chico	1

In this paper, values of the components of water balance in La Yesca municipality are determined. However, due to the reduced information availability in the zone, the water volumes estimation that involves the calculus of water balance was carried out through regionalization, where hydrological zones circumscribing the area of study were incorporated. Hence, determination of water balance component values was made for all the region. Finally, information was delimited only for the area of interest. Therefore, the purpose of this paper was to calculate the components of water balance in La Yesca municipality, Nayarit, Mexico.

Materials and Methods

Area of study

La Yesca has a total surface of 4,316.311 km². It is the second more extent municipality of the state. It is located in south part of the Sierra Madre Occidental, between the coordinates 21° 10' to 22° 00' North latitude and 103° 43" to 104° 33' west longitude. It limits north with the municipality

En este trabajo se determinan los valores de las componentes del balance hídrico en el municipio de La Yesca. Sin embargo, debido a la disponibilidad reducida de información en la zona. La estimación de los volúmenes de agua que involucra el cálculo del balance hídrico, se llevó a cabo mediante una regionalización, donde se incorporaron las zonas hidrológicas que circunscriben el área de estudio. De esta forma se realizó la determinación de los valores de las componentes del balance hídrico para toda la región. Finalmente, se acotó la información solo para el área de interés. Por lo que el propósito del presente trabajo fue calcular las componentes del balance hídrico en el municipio de La Yesca, Nayarit, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La Yesca tiene una superficie de 4,316.311 km². Es el segundo municipio más extenso de la entidad. Se ubica en la parte sur de la Sierra Madre Occidental, entre las

El Nayar and the state of Jalisco, East and South with the state of Jalisco, Southwest with the municipalities of Santa María del Oro, Jala and Ixtlán del Río and West with the municipality El Nayar.

Hilly areas constitute 95 % of the surface and semi-flat areas only 5 % approximately. Their main elevations are the Sierra el Pinabete at 1,420 masl, Sierra Pajaritos at 2,500 masl and Sierra de Álica at 2,200 masl. It has vast forest and mining resources, as well as grassland zones for extensive livestock breeding. More than 50 % of its territory is forest with oaks and pines, 20 % is jungle. It is bordered South by the Santiago River, which converges with the Bolaños River just before the hydroelectric central La Yesca Dam (Figure 3); the flow that conducts the Santiago River is registered by the hydrometric station “La Yesca” (12438), while the Bolaños River is registered by the station “El Caimán” (12514). In the course of the Santiago River, from La Yesca Dam to El Cajon Dam, the riverbeds of the “Jora Viejo” and “Platanar-Palmillas” streams converge. North,

coordenadas 21° 10' al 22° 00' de latitud norte y 103° 43' al 104° 33' de longitud oeste. Limita al norte con el municipio de El Nayar y el estado de Jalisco, al este y sur con el estado de Jalisco, al suroeste con los municipios de Santa María del Oro, Jala e Ixtlán del Río y al oeste con el municipio de El Nayar.

Las zonas accidentadas abarcan el 95 % de la superficie y las semiplanas solo el 5 %, aproximadamente. Sus principales elevaciones son la Sierra el Pinabete a 1,420 msnm, la Sierra Pajaritos a 2,500 msnm y la Sierra de Álica con 2,200 msnm. Posee vastos recursos forestales y mineros, así como zonas de pastizales propias para la ganadería extensiva. Más de un 50 % de su territorio es bosque con especies de encinos y pino, un 20 % es selva. Cuenta con el río Santiago que bordea el sur del municipio y que converge con el río Bolaños poco antes de la central hidroeléctrica Presa La Yesca (Figura 3); el caudal que conduce el río Santiago es registrado por la estación hidrométrica “La Yesca” (12438), mientras que el río Bolaños por la estación “El Caimán” (12514). En el recorrido del río Santiago, desde la Presa La Yesca hasta la Presa El Cajón, confluyen los cauces de los arroyos “Jora Viejo” y el “Platanar-



Figure 3. Hydrographic network of La Yesca municipality, Nay.

Source: adapted from INEGI (2010).

Figura 3. Red hidrográfrica del municipio de La Yesca.

Fuente: adaptado de INEGI (2010).

La Yesca municipality is bordered by the Chapalanguana River, where waters of the streams El Naranjo and Huajimic converge, as well as the riverbed of the stream Camotlan.

For the estimation of the water balance components of La Yesca municipality, the methodology developed by Gómez-Reyes (2013) was used, which uses statistical and geographical information. Therefore, morphological, climatological and hydrological information was gathered to evaluate the volumes generated by the hydrological processes in La Yesca municipality. However, there are very few climatological stations available there to perform the estimations of water volumes that involve calculus of the water balance. For that reason, information beyond the limits of the municipality was incorporated; the water balance components are then delimited to the limits of La Yesca municipality. In this regionalized way, climatological information consisted in the gathering of 30 years of average rainfall and temperature data in 74 climatological stations (Figure 4) that the National Weather Service operates. The information was taken from

Palmillas". Por el norte, el municipio de La Yesca es bordeado por río Chapalanguana en el que confluyen las aguas de los arroyos El Naranjo y Huajimic, así como también se cuenta con el cauce del arroyo Camotlán.

Para la estimación de los componentes del balance de agua del municipio de La Yesca se utilizó la metodología desarrollada por Gómez-Reyes (2013), la cual emplea la información estadística y geográfica. Para lo cual se recopiló información morfológica, climatológica e hidrológica para evaluar los volúmenes generados por los procesos hidrológicos en el municipio de La Yesca. Sin embargo, en este municipio se dispone de pocas estaciones climatológicas para realizar las estimaciones de los volúmenes de agua que involucra el cálculo del balance hídrico. Por esta razón se incorporó información más allá de los límites del municipio; las componentes del balance hídrico son luego acotadas a los límites del municipio de La Yesca. De esta manera regionalizada, la información climatológica consistió del conjunto de 30 años de datos pluviométricos y de temperaturas medios en 74 estaciones climatológicas (Figura 4) que opera el Servicio Meteorológico Nacional. La información fue extraída de la base de datos de las normales

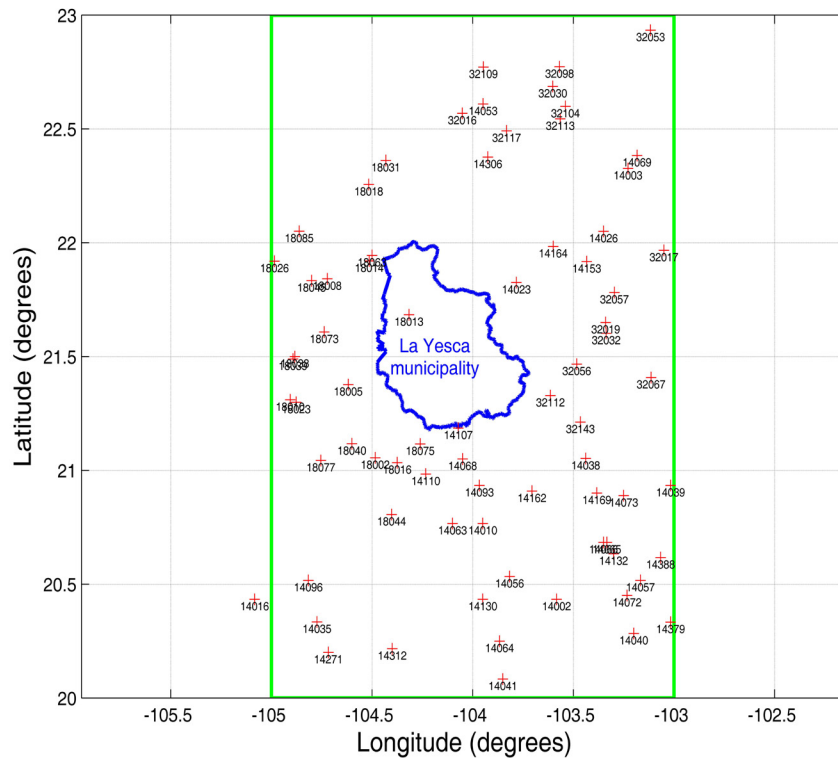


Figure 4. Weather stations of La Yesca municipality and its surroundings.

Figura 4. Estaciones climatológicas en el municipio de La Yesca y su región de entorno.

the database of the climatological norms from the period 1971-2010, made by the National Weather Service.

Hydrological information was integrated by the spatial distribution over La Yesca municipality, from the C runoff coefficients (Figure 5). Values of C were obtained from the vector data from the hydrological charts of superficial waters 1:250,000, available in the INEGI (National Institute of Statistics, Geography and Informatics). On the other hand, the morphological information of La Yesca municipality was obtained from the vector data in the topographic charts 1:50,000 from INEGI (2010).

In order to calculate other external and internal processes of water flow that include the water balance components of La Yesca municipality, such as the utilization of superficial and underground water (wells), transfers (import and export of flows), supplied water uses (domestic, industrial and agricultural), information of average daily outputs was gathered in hydrometric stations located in the municipality, as well as from the superficial water flows compromised and from the aquifer of the municipality.

climatológicas del período 1971-2010, elaborado por el Servicio Meteorológico Nacional.

La información hidrológica estuvo integrada por la distribución espacial, sobre el municipio de La Yesca, de los coeficientes de escurrimiento C (Figura 5). Los valores de C se obtuvieron a partir del conjunto de datos vectoriales de las cartas hidrológicas de aguas superficiales 1:250,000, disponibles en el INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Por otra parte, la información morfológica del municipio de La Yesca se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas 1:50,000 del INEGI (2010).

Con el fin de calcular otros procesos externos e internos del flujo del agua que comprenden componentes del balance hídrico del municipio de La Yesca, como son los aprovechamientos de aguas superficiales y de aguas subterráneas (pozos), trasvases (importaciones y exportaciones de caudales), usos del agua suministrada (domésticos, industrial y agrícola), se recopiló información de gastos medios diarios registrados en estaciones hidrométricas ubicadas en el municipio, así como de los caudales comprometidos de aguas superficiales y del acuífero en el municipio.

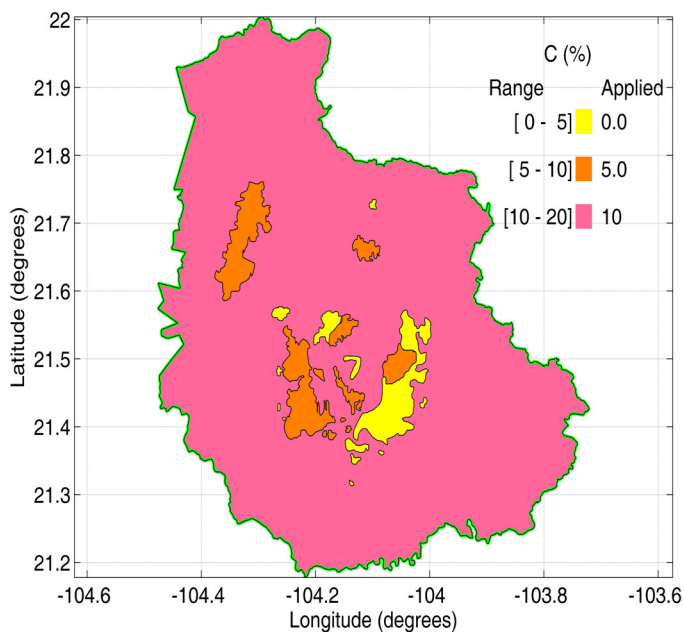


Figure 5. Runoff coefficients (C) of La Yesca municipality, Nayarit.

Source: adapted from INEGI (2010).

Figura 5. Coeficientes de escurrimiento (C) en el municipio de La Yesca, Nayarit.

Fuente: adaptada de INEGI (2010).

Outputs of the Bolaños and Santiago Rivers, which cross and border La Yesca municipality, registered in the hydrometric stations 12514 (El Caimán) and 12438 (La Yesca), respectively, were obtained from the National Database of Superficial Water (BANDAS), made by the Mexican Institute of Water Technology (IMTA). On the other hand, superficial and underground water volumes outsourced to the users of La Yesca were obtained from the Public Registry of Water Rights (REPDA) gathered by the National Water Commission (CONAGUA). Database REPDA contains information on the annual water extraction volume, for both superficial and underground utilizations.

Water balance component

Mean annual pluvial precipitation volumes in La Yesca municipality (Q_{rain}) were estimated based on the average isohyets of the climatological data from the period 1971-2010. Lines of equal precipitation were generated with a biharmonic cubic interpolation algorithm (Sandwell, 1987) that used data of pluvial precipitation registered in the meteorological stations located in the region around La Yesca municipality. In the interpolation process information on the altitude of precipitation (hpc) in the center of each spatial vector in the resolution area ($Areac$) which is designated for the calculus of the water volumes in the study area; in this case, approximately 100 ha (0.010° latitude X 0.010° longitude). Hence, the total of the addition of the product $hpc \cdot Areac$ from all sectors in the area of study determine the volume of pluvial precipitation:

$$Q_{rain} = \sum_{i=1}^{i=N} hpc_i \cdot Areac_i \quad (1)$$

Where N is the total number of sectors i in the area of study.

When dividing the equation (1) by the total area of the municipality (A_{study}), the average value of pluvial precipitation in the area of study is obtained (\overline{hpc}) weighted by area:

$$\overline{hpc} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} hpc_i \cdot Areac_i}{A_{study}} \quad (2)$$

Annual average evapotranspiration volumes that scape from La Yesca municipality (Q_{ET}), were calculated by applying the algorithm Turc (1954). This algorithm relates precipitation and temperature in each climatological station to obtain real evapotranspiration

Los gastos de los ríos Bolaños y Santiago que atraviesan y bordean el municipio de La Yesca, registrados en las estaciones hidrométricas 12514 (El Caimán) y 12438 (La Yesca), respectivamente, se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Por otro lado, los volúmenes de aguas superficiales y subterráneos concesionados a los usuarios del municipio de La Yesca, se obtuvieron del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), compilado por el la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La base de datos REPDA contiene información del volumen anual de extracción de agua, tanto de aprovechamientos superficiales como subterráneos.

Componente del balance hídrico

Los volúmenes de precipitación pluvial media anual en el municipio de La Yesca (Q_{lluvia}), se estimaron en base a las isoyetas promedio de las normales climatológicas del periodo 1971-2010. Las líneas de igual precipitación se generaron con un algoritmo de interpolación cúbica biarmónica (Sandwell, 1987) que utilizó los datos de precipitación pluvial registrados en las estaciones meteorológicas ubicadas en la región de entorno alrededor del municipio de La Yesca. En el proceso de interpolación se genera información de la altura de precipitación (hpc) en el centro de cada sector espacial de área de resolución ($Areac$) que se designa para el cálculo de los volúmenes de agua en el área de estudio; en este caso aproximadamente 100 ha (0.010° latitud X 0.010° longitud). De manera tal que la suma del producto $hpc \cdot Areac$ de todos los sectores del área en estudio, determina el volumen de precipitación pluvial:

$$Q_{lluvia} = \sum_{i=1}^{i=N} hpc_i \cdot Areac_i \quad (1)$$

En donde N es el número total de sectores i del área de estudio.

Al dividir la ecuación (1) entre el área total del municipio ($A_{estudio}$), se obtiene el valor promedio de la precipitación pluvial del área de estudio (\overline{hpc}) ponderado por área:

$$\overline{hpc} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} hpc_i \cdot Areac_i}{A_{estudio}} \quad (2)$$

Los volúmenes de evapotranspiración medios anuales que se escapan del municipio de La Yesca (Q_{ET}), se calcularon aplicando el algoritmo Turc (1954). En este algoritmo se relaciona la precipitación y la temperatura de cada estación climatológica para obtener la evapotranspiración

(*RET*), i.e., evapotranspiration produced under real humidity conditions of the soil and vegetal covering (Remenieras, 1971):

$$RET = \frac{hp}{\sqrt{0.9 + \frac{hp}{L}}} \quad (3)$$

Where:

RET = Real evapotranspiration (mm/year).

hp = Precipitation (mm/year).

$L = 300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$.

T = Mean annual temperature of the air ($^{\circ}\text{C}$).

Stimulation of Q_{ET} is obtained once the values of *RET* in each climatological station have been calculated, by means of biharmonic cubic interpolation (Sandwell, 1987) of *RET_c*, which represents the value on *RET* in the center of each spatial sector in the resolution area of the territory in study, in each 100 ha approximately. Likewise, as estimated with Q_{rain} , the addition of the product *RET_c*·*Areac* from all sectors of the area of study determines the evapotranspiration volume:

$$Q_{ET} = \sum_{i=1}^{i=N} RETc_i \cdot Areac_i \quad (4)$$

As well, when dividing equation (4) by the total of the area, the average value of evapotranspiration of the study area (\overline{ET}) weighted by area is obtained.

Estimation of runoff volumes that are generated by rainfall precipitated over La Yesca municipality (Q_{runoff}) was made by applying the rational algorithm (Chow, 1964). This algorithm considers that from the total of pluvial precipitation that falls over the area of study, only part of the rain in excess contributes to runoffs. Rain water is available once saturation over the surface of the soil by infiltration has been reached. Therefore, it assumes that average runoff (*Q*) in a drainage area (*A*) is proportional to the amount of mean precipitation (*I*) that falls on the area in a unit of time:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (5)$$

Where:

Q = Runoff waste in *cfs*.

I = Rain intensity (*inch/h*).

real (*ETR*), i.e., la evapotranspiración que se produce bajo condiciones reales de humedad del suelo y la cobertura vegetal (Remenieras, 1971):

$$ETR = \frac{hp}{\sqrt{0.9 + \frac{hp}{L}}} \quad (3)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración Real (mm/año).

hp = Precipitación (mm/año).

$L = 300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$.

T = Temperatura media anual del aire ($^{\circ}\text{C}$).

La estimación de Q_{ET} se obtiene, una vez calculado los valores de *ETR* en cada estación climatológica, mediante la interpolación cúbica biarmónica (Sandwell, 1987) de *ETRC* que representa el valor de *ETR* en el centro de cada sector espacial de área de resolución del territorio en estudio, en cada 100 ha aproximadamente. De igual manera como se estimó Q_{lluvia} , ahora la suma del producto *ETRC*·*Areac* de todos los sectores del área de estudio, determina el volumen de evapotranspiración:

$$Q_{ET} = \sum_{i=1}^{i=N} ETRc_i \cdot Areac_i \quad (4)$$

Así mismo, al dividir la ecuación (4) entre el área total del área en cuestión, se obtiene el valor promedio de la evapotranspiración de área de estudio (\overline{ET}) ponderado por área.

La estimación de los volúmenes de escurrimiento que se generan por la lluvia que precipita sobre el municipio de La Yesca ($Q_{escurrimiento}$), se realizó aplicando el algoritmo Racional (Chow, 1964). En este algoritmo se considera que del total de precipitación pluvial que cae sobre el área en estudio, solo la parte de la lluvia en exceso contribuye al escurrimiento. El agua de lluvia disponible una vez que se ha alcanzado la saturación de la superficie del suelo por infiltración. Por lo que asume que el escurrimiento medio (*Q*) en un área (*A*) de drenaje es proporcional a la cantidad de precipitación media (*I*) que cae sobre el área en una unidad de tiempo:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (5)$$

Donde:

Q = Gasto del escurrimiento en *cfs*.

I = Intensidad de lluvia (*pulgadas/h*).

A = Area of study in acres.

C = Runoff coefficient (non-dimensional), estimated from the type and use of soil in the annual precipitation volume in the area of study.

C values represent the percentage of superficial water that drains. According to its spatial variation, C values are grouped in ranges that represent runoff conditions: [0 % to 5 %], [5 % to 10 %], [10 % to 20 %], [20 % to 30 %] and [30 % to 100 %]. Application of equation (5) in each spatial sector of resolution in the area of study allows to estimate the volume of sectorial runoff (Q_c). Thus, the runoff volume (Q_{runoff}) is determined with the adding of Q_c on all the sectors of the area:

$$Q_{runoff} = \sum_{i=1}^{i=N} Q_{c_i} \quad (6)$$

Observe that in the equation (6) mean annual precipitation has been considered as rain intensity, besides the corresponding conversion of units in order to express Q_{runoff} in $m^3 s^{-1}$. Likewise, when dividing this equation by the total area of study, the average value of the accumulated runoff sheet (\bar{h}_Q) weighted by area is obtained.

Estimation of infiltration volumes that are generated on La Yesca municipality ($Q_{infiltrate}$), was made by the Hydrological Balance algorithm. This algorithm considers that from rain volumes that precipitate over the municipality (Q_{rain}), a part returns to the atmosphere either by direct evaporation or vegetation transpiration (Q_{ET}). Another part runs off through the surface (Q_{runoff}), and the rest infiltrates the soil and then incorporates the aquifer ($Q_{infiltrate}$). Besides, these magnitudes must fulfill the equation of hydrological balance (Pladeyra *et al.*, 2006):

$$Q_{rain} = Q_{ET} + Q_{runoff} + Q_{infiltrate} \quad (7)$$

Application of equation (7) in each spatial sector of resolution allows the estimation of the sectorial infiltration volume (q_c), all times estimation with the other water volumes in all sectors of the area of study is available. Therefore, $Q_{infiltrate}$ is determined by adding these volumes of sectorial infiltration in all area of study:

A = Área en estudio en acres.

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional), estimado a partir del tipo y uso del suelo y del volumen de precipitación anual del área en estudio.

Los valores de C representan el porcentaje del agua superficial que drena. De acuerdo a su variación espacial, los valores de C se agrupan en rangos que representan las condiciones del escurrimiento: [0 % a 5 %], [5 % a 10 %], [10 % a 20 %], [20 % a 30 %] y [30 % a 100 %]. La aplicación de la ecuación (5), en cada sector espacial de resolución del área en estudio, permite estimar el volumen de escurrimiento sectorial (Q_c). De manera tal que el volumen de escurrimiento ($Q_{escurre}$) se determina con la suma de Q_c sobre todos los sectores del área en cuestión:

$$Q_{escurre} = \sum_{i=1}^{i=N} Q_{c_i} \quad (6)$$

Obsérvese que en la ecuación (6) se ha considerado la precipitación media anual como intensidad de lluvia, además de la correspondiente conversión de unidades para expresar $Q_{escurre}$ en $m^3 s^{-1}$. Así mismo, al dividir esta ecuación entre el área total de estudio, se obtiene el valor promedio de la lámina acumulada de escurrimiento (\bar{h}_Q) ponderada por área.

La estimación de los volúmenes de infiltración que se generan en el municipio de La Yesca ($Q_{infiltra}$), se realizó mediante el algoritmo del Balance Hidrológico. En este algoritmo se considera que de los volúmenes de lluvia que precipitan sobre el municipio (Q_{lluvia}), una parte retorna a la atmósfera ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación (Q_{ET}); otra parte escurre por la superficie ($Q_{escurre}$) y el resto se infiltra en el terreno y se incorpora al acuífero ($Q_{infiltra}$). Además de que estas magnitudes deben cumplir la ecuación del balance hidrológico (Pladeyra *et al.*, 2006):

$$Q_{lluvia} = Q_{ET} + Q_{escurre} + Q_{infiltra} \quad (7)$$

La aplicación de la ecuación (7), en cada sector espacial de resolución, permite estimar el volumen de infiltración sectorial (q_c), toda vez que ya se cuenta con la estimación de los demás volúmenes de agua en todos los sectores del área de estudio. De manera tal que $Q_{infiltra}$ se determina al sumar estos volúmenes de infiltración sectoriales en toda el área en cuestión:

$$Q_{infiltrate} = \sum_{i=1}^{i=N} q^c_i \quad (8)$$

When dividing equation (8) by the total area of the municipality, the average value of the accumulated infiltration sheet (\overline{fiq}) weighted by area is obtained. It is important to note that the application of the algorithm of hydrological balance to obtain $Q_{infiltrate}$ is only applicable for $Q_{rain} \gg Q_{ET}$ when rain intensity exceeds the evapotranspiration rates, which generally occurs in humid regions and storm events. However, in arid and semi-arid regions, we suggest to obtain $Q_{infiltrate}$ in short periods of time and by applying a water balance in the soil, starting in the rain months, as described in Remenieras (1971).

On the other hand, amongst the water balance components that have registered data, the transfer volumes are included. These are volumes of flows coming or induced from the different sources or destinations of the water.

A fundamental component of water balance is the annual extraction volume of superficial and underground utilizations. In order to determine the volumes of these utilizations directly, statistics of water volumes per sector of users are required (*v. gr.*, public, agricultural and industrial) which are available in the REPDA. For practical purposes, the 12 topics of consumptive use that the Registry covers are stated here in the next three:

- Public use, for domestic and urban public supply.
- Agricultural use, which also includes livestock, aquaculture, multiple and other uses.
- Industrial use; under this modality self-supplied industry, services, commerce and electric energy generation for electric generator plants that are not hydroelectric; the use of water of these plants is considered non- consumptive and the same water that is centrifuged is counted as part of the consumptive use to which it is destined.

Results and Discussion

Isohyet contours calculated for La Yesca municipality (Figure 6), indicate that mean annual precipitation is around 500 mm in the North zone and until 1,200 mm to the East of the municipality; mean annual precipitation of La Yesca municipality was calculated in 839 mm. On the other hand, calculated

$$Q_{infiltra} = \sum_{i=1}^{i=N} q^c_i \quad (8)$$

Al dividir la ecuación (8) entre el área total del municipio, se obtiene el valor promedio de la lámina acumulada de infiltración en el municipio de La Yesca (\overline{fiq}) ponderado por área. Es importante notar que la aplicación del algoritmo del balance hidrológico para obtener $Q_{infiltra}$ solo es aplicable para cuando $Q_{lluvia} \gg Q_{ET}$ cuando la intensidad de lluvia exceden las tasas de evapotranspiración, lo cual generalmente sucede en regiones húmedas y en eventos de tormentas. Sin embargo, en regiones áridas y semiáridas, se sugiere obtener $Q_{infiltra}$ en periodos cortos de tiempo y aplicando un balance de agua en el suelo, empezando en los meses de lluvia, como se describe en Remenieras (1971).

Por otro lado, entre los componentes del balance hídrico que cuentan con registros de datos, se incluyen los volúmenes de trasvase. Estos son volúmenes de caudales provenientes o inducidos de las diferentes fuentes o destinos del agua.

Un componente fundamental del balance hídrico es su volumen anual de extracción de los aprovechamientos superficiales y subterráneos. Para poder determinar los volúmenes de estos aprovechamientos de manera directa, se requieren las estadísticas de volúmenes de agua por sectores de usuarios (*v. gr.*, público, agrícola e industrial) que están disponibles en el REPDA. Para fines prácticos, los 12 temas de usos consuntivos que agrupa el Registro, aquí se tipifican en los siguientes tres agregados:

- Uso Público, para abastecimiento Doméstico y Público Urbano.
- Uso Agrícola, el cual incluye, además, el Pecuario, Acuicultura, Múltiples Usos y Otros Usos.
- Uso Industrial; bajo esta modalidad se incluye la Industria Autoabastecida, Agroindustrial, Servicios, Comercio y Generación de Energía Eléctrica para plantas generadoras de electricidad que no son hidroeléctricas; el uso del agua de estas plantas se considera no consuntivo y la misma agua que se turbinada se contabiliza como parte del uso consuntivo al que sea destinada.

Resultados y Discusión

Los contornos de isoyetas calculados para el municipio de La Yesca (Figura 6), indican que la precipitación media anual oscila entre 500 mm en la zona norte, hasta

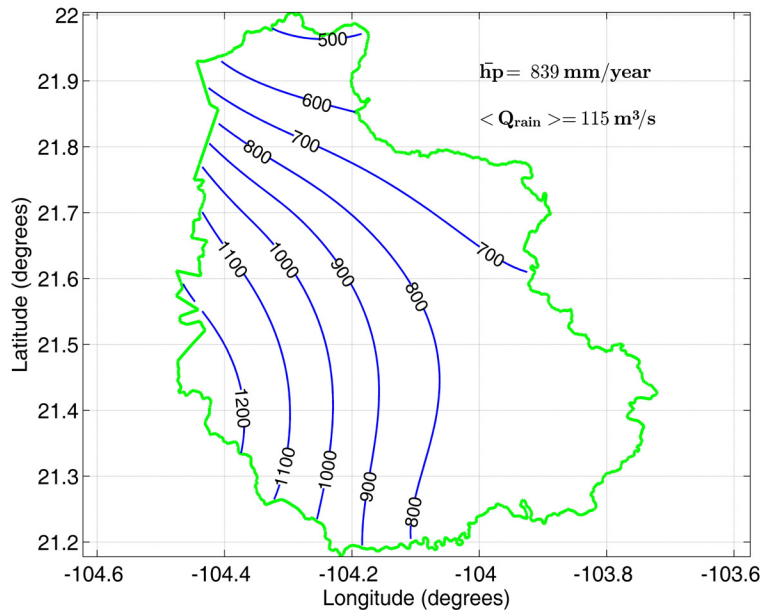


Figure 6. Mean annual isohyets (mm/year), in La Yesca municipality.

Figura 6. Isoyetas medias anuales (mm/año) en el municipio de La Yesca.

volume of mean annual precipitation in the municipality was $114.856 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

The municipality presents few spatial variability of mean annual evapotranspiration (Figure 7). Minimum values were calculated of 600 mm and maximum of 900 mm in the North and East zones, respectively, with an average of 739 mm/year on the municipality. Calculated volume of mean annual evapotranspiration in La Yesca municipality was $101.141 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

When applying the average range of runoffs coefficient, a mean annual volume of runoff in La Yesca municipality of $10.696 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figure 8) was obtained. The highest runoff of $2.556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in the municipality was generated over the sub-basin of the stream Comatlan, in the Northeast of the municipality. Similarly, it was observed that the sub-basins with strands in the South of the municipality to the flow of the Santiago River (Bolaños, Presa La Yesca, Jora Viejo, Palmillas-Platanar) provided 60 % of the total runoff of La Yesca municipality.

Contours of same infiltration rates that enter the interior of the subsoil, according to the water balance algorithm are shown in Figure 9. This indicates that

1,200 mm al poniente del municipio; la precipitación media anual del municipio de La Yesca fue calculada en 839 mm. Por otro lado, el volumen calculado de la precipitación pluvial media anual en el municipio fue de $114.856 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El municipio presenta poca variabilidad espacial de la evapotranspiración media anual (Figura 7). Se calcularon valores mínimos de 600 mm y máximos de 900 mm en las zonas norte y poniente, respectivamente, con un promedio de 739 mm/año sobre el municipio. El volumen calculado de la evapotranspiración media anual en el municipio de La Yesca fue de $101.141 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Aplicando el valor medio del rango de los coeficientes de escurrimiento, se obtuvo un volumen de escurrimiento medio anual en el municipio de La Yesca de $10.696 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figura 8). El mayor escurrimiento de $2.556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en el municipio se generó sobre la subcuenca del arroyo Comatlán, en el nororiente del municipio. Asimismo se observó que las subcuencas con vertientes al sur del municipio, hacia el cauce del río Santiago (Bolaños, Presa La Yesca, Jora Viejo, Palmillas-Platanar) aportaron el 60 % del escurrimiento total del municipio de La Yesca.

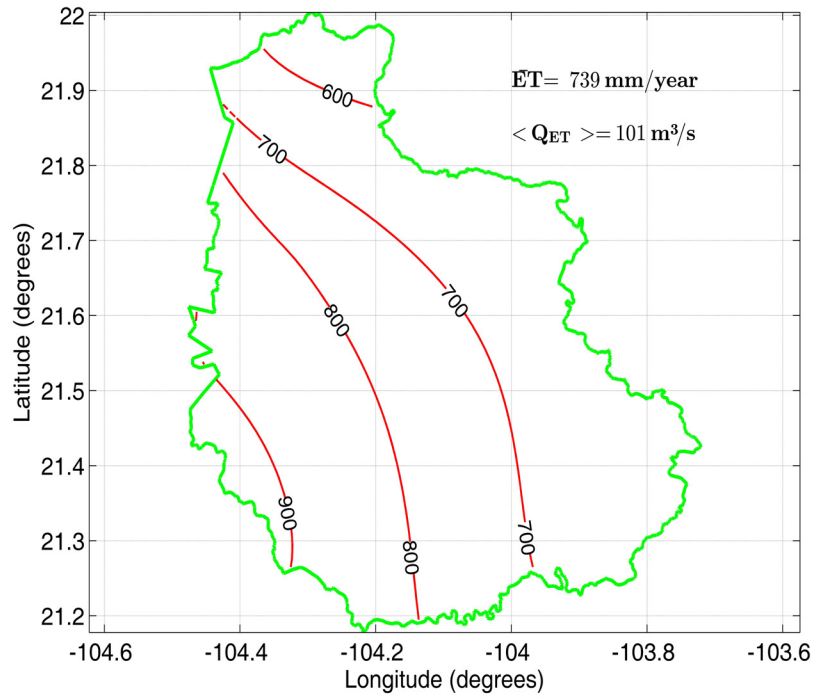


Figure 7. Annual average evapotranspiration (mm/year), in La Yesca municipality.
Figura 7. Evapotranspiración media anual (mm/año) en el municipio de La Yesca.

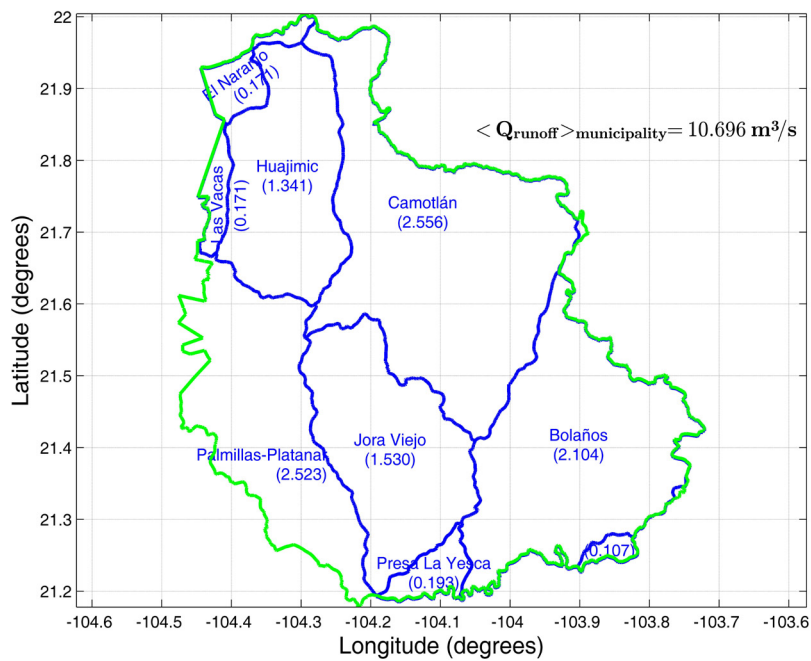


Figure 8. Average runoff volume ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), in La Yesca municipality.
Figure 8. Average runoff volume ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), in La Yesca municipality.

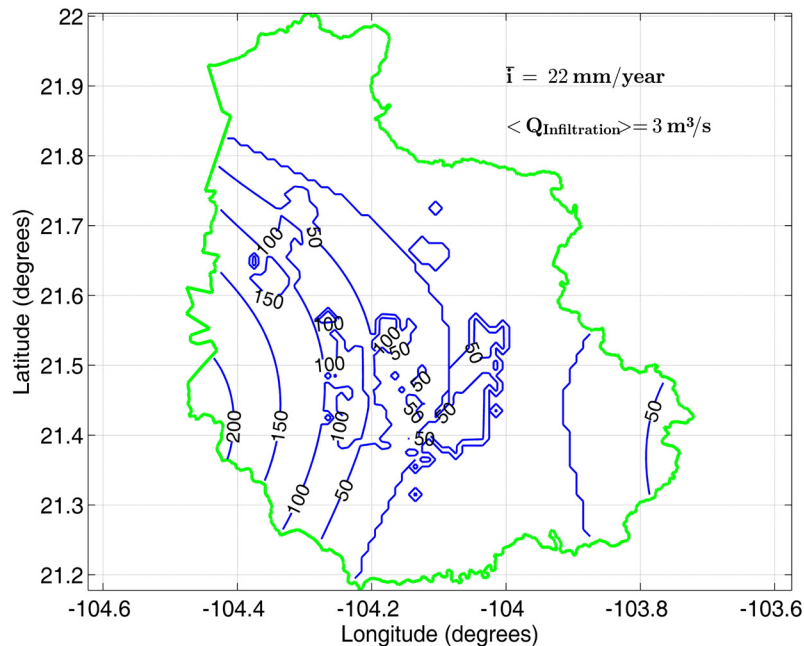


Figure 9. Annual average infiltration (mm/year), in La Yesca municipality.
Figura 9. Infiltración media anual (mm/año) en el municipio de La Yesca.

the municipality presents infiltration zones of up to 200 mm year⁻¹ in the West, while in north and East there are no infiltration zones; the average of the infiltration sheet over the municipality was of 22 mm year⁻¹. The calculated annual average infiltration volume in La Yesca municipality was of 3.019 m³ s⁻¹.

In the case of this municipality, it has been registered that the Bolaños River contributes an average output of 25.755 m³ s⁻¹, while the Santiago River covers 94.448 m³ s⁻¹ (Figure 10). The average import water volume to La Yesca municipality ($Q_{importa}$), therefore, is the confluence of the average flows of the Santiago and Bolaños Rivers, the latter with the volume correction of contribution of the sub-basin Bolaños (2.104 m³ s⁻¹), i.e., $Q_{importa} = 118.099 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Regarding the average water export volume of La Yesca municipality ($Q_{exporta}$), it proceeds mainly through the South exit (El Cajon Dam) via Santiago River (Q_{Cajon}), as well as through the North exit via Chapalanga River ($Q_{Chapalanga}$) and the mouth of the stream Camotlan ($Q_{Camotlan} = 2.556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). On the other hand, Q_{Cajon} is formed by the flows $Q_{importa}$, more than the flows that converge to the Santiago River by its transit in the municipality to El Cajon Dam, more than the runoff volumes of the sub-basins of the hydrographic network that flow to

Los contornos de igual tasas de infiltración que ingresa al interior del subsuelo, según el algoritmo del Balance Hidrológico se muestran en la Figura 9. Esta indica que el municipio presenta zonas de infiltración de hasta 200 mm año⁻¹ en el poniente, mientras que en el norte y oriente no hay zonas de infiltración; el promedio de la lámina de infiltración sobre el municipio fue de 22 mm año⁻¹. El volumen calculado de infiltración media anual en el municipio de La Yesca fue de 3.019 m³ s⁻¹.

En el caso de este municipio se tiene registrado que el río Bolaños aporta un gasto promedio de 25.755 m³ s⁻¹, mientras que el río Santiago participa con 94.448 m³ s⁻¹ (Figura 10). El volumen promedio de importación de agua al municipio de La Yesca ($Q_{importa}$), por lo tanto, es la confluencia de los caudales promedio del río Santiago y del río Bolaños; este último con la corrección del volumen de aporte de la sub-cuenca Bolaños (2.104 m³ s⁻¹), i.e., $Q_{importa} = 118.099 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En cuanto al volumen promedio de exportación de agua del municipio de La Yesca ($Q_{exporta}$), este procede principalmente por la salida sur (Presa El Cajón), a través del río Santiago (Q_{Cajon}), así como por la salida norte a través del río Chapalanga ($Q_{Chapalanga}$) y la boquilla del arroyo Camotlán ($Q_{Camotlan} = 2.556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Por su parte, Q_{Cajon} está conformado por los caudales $Q_{importa}$, más los caudales que confluyen al río Santiago por su tránsito en el municipio hasta la Presa El Cajón, más los

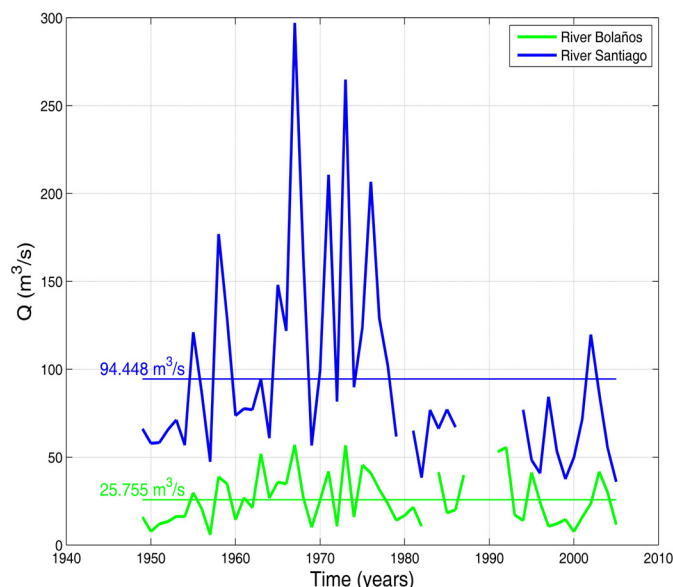


Figure 10. Historic river flows in La Yesca municipality.

Source: own elaboration with BANDAS information

Figura 10. Caudales históricos de ríos en el municipio de La Yesca.

Fuente: elaboración propia con información del BANDAS.

the south of La Yesca municipality: Bolaños, Presa La Yesca, Jora Viejo and Platanar-Palmillas. Therefore, $Q_{Cajon} = 124.449 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. For the case of $Q_{Chapalangana}$ it is formed by the runoff volumes of the sub-basins that flow north of La Yesca municipality (El Naranjo and Huajimic), $Q_{Chapalangana} = 1.512 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. This way, a value for Q_{export} of $128.517 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ can be estimated.

Q_{export} is mainly modulated through the south exit (Q_{Cajon}), since it represents the 97% of the exportation flow. Therefore, adjustments that should be made to Q_{export} from the sub-basin Las Vacas ($-0.171 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and the small sub-basin at the south of Bolaños ($-0.107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), as well as for the volumes of superficial waters compromised by diverse used in the municipality ($-0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; described in the next paragraphs) are not significant.

Superficial utilizations refer to water intakes for diverse use, from the water volumes available in the superficial water bodies, such as: lakes, lagoons and regulation vessels, from which $0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ are utilized according to REPDA concessions (public = $0.022 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; agricultural = $0.004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; industrial = $0.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). This utilization volume is considered marginal, since in the municipality La Yesca $10.696 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ of surface runoff is generated.

volumenes de escurrimiento de las subcuencas de la red hidrográfica que vierten al sur del municipio de La Yesca: Bolaños, Presa La Yesca, Jora Viejo y Platanar-Palmillas. Por lo tanto, $Q_{Cajon} = 124.449 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para el caso de $Q_{Chapalangana}$, este está conformado por los volúmenes de escurrimiento de las subcuencas que vierten al norte del municipio de La Yesca (El Naranjo y Huajimic), $Q_{Chapalangana} = 1.512 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. De esta manera se puede estimar un valor para $Q_{exporta}$ de $128.517 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$Q_{exporta}$ está modulado principalmente por la salida sur (Q_{Cajon}), ya que representa el 97% del caudal de exportación. Por lo mismo, los ajustes que se debieran hacerse a $Q_{exporta}$ por la subcuenca Las Vacas ($-0.171 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y la pequeña subcuenca al sur de Bolaños ($-0.107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), así como por los volúmenes de aguas superficiales comprometidos por los diversos usuarios en el municipio ($-0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; descritos en los párrafos subsiguiente), no son significativos

Los aprovechamientos superficiales se refieren al consumo de agua para diversos usos, de los volúmenes de agua disponibles en los cuerpos de agua superficiales, como: lagos, lagunas y vasos de regulación, de los cuales se aprovechan $0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ según las concesiones del REPDA (público = $0.022 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; agrícola = $0.004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; industrial = $0.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Este volumen de aprovechamiento se considera muy marginal, toda vez que en el municipio de La Yesca se generan $10.696 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de escurrimiento superficial.

Table 2.
Annual average flow estimation in La Yesca municipality
Tabla 2.
Estimación de flujos promedios anuales en el municipio de La Yesca.

Flow	Symbols	Magnitude ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Inputs		
Rain	Q_{rain}	114.856
Extraction	Q_{well}	0.004
Import	Q_{import}	118.099
Returns		
Superficial Utilization	$Q_{superficial}$	0.026
Outputs		
Evapotranspiration	Q_{ET}	101.141
Runoff	Q_{runoff}	10.696 ^a
Infiltration	$Q_{infiltrate}$	3.019 ^a
Export	Q_{export}	128.517
Intakes		
Public use	Q_{public_use}	0.026 ^b
Agricultural use	$Q_{agricultural_use}$	0.004 ^b
Industrial use	$Q_{industrial_use}$	0.000 ^b

^aAvailable water = $13.715 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; ^bConsumptive use = $0.030 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

^aAgua disponible = $13.715 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; ^bUso consuntivo = $0.030 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

On the other hand, nowadays there are practically no utilization volumes of ground water in La Yesca municipality. Until 2007, the industrial use consisted of approximately the total of utilization volumes of ground water; despite this fact, ground water extraction (public = $0.004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; agricultural = $0.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; industrial = $0.259 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) consisted only the 9 % from the aquifer recharge ($Q_{infiltrate}$).

Water Balance

Obtained results from the estimations of the water balance in La Yesca municipality are shown in Table 2. The analysis of the magnitude of these components indicates that the transfer flows,

Por otra parte, actualmente prácticamente no existen volúmenes de aprovechamiento de agua subterránea en el municipio de La Yesca. Hasta el año de 2007, el uso industrial constituía aproximadamente el total de los volúmenes de aprovechamiento de agua subterránea; a pesar de esto, la extracción de agua subterránea (público = $0.004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; agrícola = $0.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; industrial = $0.259 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) constituía solamente el 9 % de la recarga del acuífero ($Q_{infiltra}$).

Balance hídrico

Los resultados obtenidos de las estimaciones de las componentes del balance hídrico en el municipio de La Yesca se muestran en Tabla 2. El análisis de la magnitud de estas componentes indica que los flujos de trasvase, espe-

specifically the importation flows of the Santiago and Bolaños Rivers, together with rain volumes and evapotranspiration, are the most important components that rule water balance in La Yesca municipality. This result is of high relevance, since it indicates that hydric conditions in La Yesca municipality are not sensitive to climate variations. This means, alterations in the water volumes of the municipality that might be generated by climate change, can be compensated through an adequate management of transfer volumes.

La Yesca municipality has available water volumes, in both superficial waters ($10.696 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) as well as in underground waters ($3.019 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La Yesca presents a very low pressure degree due to the hydric resource (0.2 %), since all volumes of consumptive use are insignificant ($0.030 \text{ m}^3/\text{s}$) compared to the ones available ($13.715 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

On the other hand, water balance analysis in La Yesca municipality reveals the capability of increasing superficial waters utilizations in any of the sub-basins that form the hydrographic network of the municipality, since the assigned volumes for diverse consumptive uses are imperceptible ($0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Water balance analysis of La Yesca also confirms a surplus in the balance of the portion of aquifers that underlies the municipality (Valle Santiago-San Blas and Bolaños Aquifers). Annual extraction is $0.004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while annual recharge of underground water is calculated in $3.019 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, there is practically no aquifer exploitation. Therefore, both portions of Valle Santiago-San Blas and Bolaños aquifers have water volumes available for utilization.

Calculus on the components of the balance equation used in this paper are subject to certain uncertainty, which depends on the origin and measurement of the variable values (*i. e.*, quality and quantity of collected information), as well as the algorithm used for its calculus. Due to the fact that this investigation is intended to contribute with a calculus procedure in the estimation of water balances of La Yesca municipality, uncertainty is associated to an error in the calculus estimation (Taylor, 1982), considering it as the difference between the real value (uncertainty 0 %) and the one calculated by the algorithms used. This error concept is hard to be

eficacemente los caudales de importación de los ríos Santiago y Bolaños, junto con los volúmenes de lluvia y evapotranspiración, son las componentes más importantes que rigen el balance hídrico en el municipio de La Yesca. Este resultado es de mayor relevancia, toda vez que nos dice que las condiciones hídricas del municipio de La Yesca no son sensibles a las variaciones climáticas. Es decir, las alteraciones en los volúmenes de agua del municipio que pudieran generarse por el cambio climático, pueden ser compensadas mediante un manejo adecuado de los volúmenes de trasvases.

El municipio de la Yesca cuenta con volúmenes de agua disponibles, tanto en aguas superficiales ($10.696 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) como en subterráneas ($3.019 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La Yesca presenta una grado muy bajo de presión por el recurso hídrico (0.2 %), toda vez que los volúmenes de uso consuntivo son insignificantes ($0.030 \text{ m}^3/\text{s}$) comparados con los disponibles ($13.715 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Por otra parte, el análisis del balance hídrico en el municipio de La Yesca, deja ver la capacidad de incrementar los aprovechamientos de aguas superficiales en cualquiera de las subcuencas que conforman la red hidrográfica del municipio, ya que los volúmenes asignados para los diversos usos consuntivos son imperceptibles ($0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

El análisis del balance hídrico en el municipio de La Yesca, confirma un superávit en el balance de la porción de los acuíferos que subyace el municipio (Acuífero Valle Santiago-San Blas y Acuífero Bolaños). La extracción anual es de $0.004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que la recarga anual del agua subterránea se calcula en $3.019 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, prácticamente no hay explotación del acuífero. Por lo que ambas porciones de los acuíferos Valle Santiago-San Blas y Bolaños, cuentan con volúmenes de agua disponibles para su aprovechamiento.

Los cálculos de las componentes de la ecuación de balance utilizados en este trabajo están sujetos a cierta incertidumbre, la cual está en función del origen y la medición de los valores de las variables (*i. e.*, calidad y cantidad de la información recolectada), así como del algoritmo empleado para su cálculo. Debido a que esta investigación pretende aportar un procedimiento de cálculo en la estimación de los balances hídricos del municipio de La Yesca, la incertidumbre se asocia a un error en la estimación del cálculo (Taylor, 1982), considerándola como la diferencia entre el valor real (incertidumbre 0 %) y el calculado por los algoritmos utilizados. Este concepto de error es difícil utilizarlo en una ecuación de balance, ya que el valor verdadero no se conoce

used in an equation of balance, since the real value is not known at any time, besides being always working with average values. However, the error acquires an additive value when all components that intervene in the equation are considered, by adding all uncertainties, the total balance uncertainty was obtained (Taylor, 1982), which was compared to the component for leakage loss that is calculated in the balances to perform the closing according to Aparicio-Mijares *et al.*, (2006).

Uncertainty associated with the final value of each component of water balance of the basin of La Yesca municipality was obtained evaluating the difference between the water volumes calculated in the basin (with the algorithms here presented) and the values that, officially, are reported by the CONAGUA, which for comparison purposes are here considered as real, though they are scarce. This procedure allowed to modulate the degrees of freedom (numerical algorithms coefficients) involved in the calculus of water volumes, hence uncertainty can decrease by adjusting the results to real values. Estimation of water volumes was made through a regionalization, where zones with similar behaviors in a gathering of variables linked amongst were grouped, which agreed with Gutiérrez-López (1996). Therefore, we found that not only the type of information influences directly in the estimation of the water balance volumes, but also on the quality of it. Consequently, this paper is an approximation on water balance in La Yesca municipality, with a maximum uncertainty of 20 % in respect to the data measured in field in each of the components of water balance.

Conclusions

Methodology applied for the obtaining of water balance components for the regions with scarce hydric information showed consistency with the model integrated for La Yesca municipality. Annual average water balance calculated for this paper resulted confident in 80 %, so it can be applied in adjacent basins where scarce information exists, as in the case of El Nayar municipality and others. Thus, this paper could be used for the standardization of the calculus of water balance in the Region.

References

Aparicio-Mijares, J., Lafragua-Contreras, J., Gutiérrez-López, A., Mejía-Zermeño, R. and Aguilar-Garduño, E. 2006. Evaluación de los recursos hídricos: elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas", en:

en ningún momento, además de estar trabajando siempre con valores medios; sin embargo, el error adquiere un valor aditivo cuando se consideran todas las componentes que intervienen en la ecuación, al sumar todas las incertidumbres se obtuvo la incertidumbre total del balance (Taylor, 1982), el cual se comparó con la componente de pérdidas por fugas que se calcula en los balances para efectuar el cierre de acuerdo a Aparicio-Mijares *et al.*, (2006).

La incertidumbre asociada al valor final de cada componente del balance hídrico de la cuenca del municipio de La Yesca se obtuvo evaluando la diferencia entre los volúmenes de agua calculados en la cuenca (con los algoritmos presentados aquí) y los valores que, de manera oficial, están reportados por la CONAGUA, los cuales, para fines de comparación, aquí son considerados como reales, aunque hay el inconveniente que son escasos. Este procedimiento permitió modular los grados de libertad (coeficientes de los algoritmos numéricos) involucrados en el cálculo de los volúmenes de agua, de manera tal que la incertidumbre puede decrecer al ajustar los resultados a los valores reales. La estimación de los volúmenes de agua se realizó mediante una regionalización, donde se agruparon zonas con comportamientos similares de un conjunto de variables ligadas entre sí, lo que estuvo de acuerdo a Gutiérrez-López (1996). Por lo que encontramos que no sólo el tipo de información influye directamente en la estimación de los volúmenes del balance hídrico, sino también la calidad de la misma. Por lo que el presente trabajo es una aproximación del balance de agua en el municipio de La Yesca con una incertidumbre máxima del 20 % respecto al reportado con datos medidos en campo en cada uno de los componentes del balance hídrico.

Conclusiones

Las metodologías aplicadas para la obtención de las componentes del balance hídrico para regiones con escasa información hídrica mostraron consistencia con el modelo integrado para el municipio de La Yesca. El balance hídrico promedio anual calculado en este trabajo resultó confiable en un 80 %, por lo cual puede ser aplicado en cuencas adyacentes donde hay escasas de información, como es el caso del municipio de El Nayar y otras más. Por lo que se podría utilizar este trabajo para estandarización el cálculo del balance hídrico en la Región.

- Documento técnico núm. 4. Programa Hídrico Internacional de la UNESCO para América Latina y El Caribe, 2006, 98 pp. http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/PHI_Report_Evaluacion_de_los_Recursos_Hidricos.pdf
- Aparicio-Mijares, F. J. 2007. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, 303 pp. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf
- Chow, V.T. 1964. Handbook of Hydrology: A Compendium of Water-resources Technology. McGraw-Hill. http://books.google.co.in/books/about/Handbook_of_applied_hydrology.html?id=KJQ8AAAAIAAJ
- Gomez-Reyes, E. 2013. Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del Valle de México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía* 4(3): 5-27. http://www.inegi.org.mx/RDE/RDE_10/RDE_10_Art1.html
- Gutiérrez-López, A. 1966. Identificación de regiones hidrológicamente homogéneas con base en las curvas de Andrews, en: *International Association for Hydraulic Research (IAHR)*. Guayaquil, Ecuador, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- INEGI. 2010. Red Hidrográfica: Marco Geoestadístico Municipal 2010. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico_2010.aspx
- Pladeyra, S.C., Escolero-Fuentes, O., Domínguez-Mariani, E., and Martínez-Edda, S. 2006. Ciclo Hidrológico. en: Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta, Cotler-Ávalos, H., M. Mazari-Hiriart y J. de-Anda-Sánchez, J. (editores), *Instituto Nacional de Ecología, INE-SEMARNAP*. 198 pp.
- Remenieras, G. 1971. Tratado de Hidrología Aplicada. *Editores Técnicos Asociados*, 515 pp.
- Sandwell, D.T. 1987. Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data. *Geophysical Research Letters* 14(2): 139-142. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.6141&rep=rep1&type=pdf>
- Taylor, J.M. 1982. An introduction error analysis. Oxford University Press, New York, 116 pp.
- TURC, L. 1954. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et écoulement. *Annales agronomiques* 5: 91-569.
- UNESCO. 1981. Methods for Water Balance Computation. Instituto de Hidrología de España. España. <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>

Cite this paper/Como citar este artículo: Gómez-Reyes, E., Ponce-Palafox, J.T., Arredondo-Figueroa, J.L., Castillo-Vargasmachuca, S., Benítez-Valle, A., Ramírez-León, H. (2015). Water balance of La Yesca municipality, Nayarit, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 3(3): 228-246. <http://editorial.uan.edu.mx/BIOCIENCIAS/article/view/200>

