



ARTÍCULO / ARTICLE

INFILTRACIÓN DE AGUA Y MEDICIÓN DEL CAUDAL DE ARROYOS EN LA SIERRA DE QUILA

WATER INFILTRATION AND FLOW MEASURING OF STREAMS IN LA SIERRA DE QUILA

Raymundo Villavicencio García¹, Bárbara Romina Martínez Ramírez²,
Sandra Luz Toledo González¹, Rubén Darío Guevara Gutiérrez³ y Rosaura Ávila Coria¹

RESUMEN

Con el objeto de determinar la capacidad de infiltración y calcular el caudal natural de los arroyos que abastecen de agua potable al poblado de Tecolotlán, Jalisco, se midió el escurrimiento máximo de cinco arroyos ubicados en tres microcuencas de la parte central y suroeste de la Sierra de Quila de mayo de 2012 a mayo de 2013 con el método Sección-velocidad. Para determinar la infiltración y el análisis del volumen medio anual de escurrimiento se utilizó el método indirecto Precipitación-Escurrimiento, según la NOM-011-CNA-2000. Se definieron siete sitios para el cálculo de las corrientes y dos más sobre las tomas de agua que suministran a los depósitos de Tecolotlán. Con base en la densidad de la cobertura forestal, la textura del suelo y las condiciones climáticas promedio de precipitación, temperatura y evapotranspiración, la infiltración promedio de agua de lluvia fue de 3 080, 2 935 y 1 821 m³ ha⁻¹ para las microcuencas La Campana, Santa Rosa y Corralitos. El cálculo de los caudales registró un flujo promedio de 2 527 L s⁻¹, de los cuales fluyeron 1 058 L s⁻¹ en los arroyos Salto Seco, La Campana y Betania; 1 283 L s⁻¹ en río Santa Rosa y 186 L s⁻¹ en el arroyo Corralitos. El estudio contribuirá al conocimiento del régimen hídrico de los arroyos que genera parcialmente la sierra, y precisará las recomendaciones para la gestión sobre el buen manejo y uso del recurso tanto para la autoridad administrativa y funcionarios públicos, como para los usuarios del área natural y habitantes de Tecolotlán.

Palabras clave: Escurrimiento, evapotranspiración, infiltración, precipitación, textura del suelo, velocidad de flujo.

ABSTRACT

In order to determine the infiltration capacity and the natural flow of the streams that nourish *Tecolotlán* town in Jalisco state with potable water, the maximum runoff of five brooks located in three microbasins of the central part and southwest *Sierra de Quila* from May 2012 to May 2013 with the Speed-Section Method were studied. For infiltration and the analysis of the annual mean runoff volume, the Runoff-Precipitation indirect method was used according to the NOM-011-CNA-2000. Seven sites were established to calculate flows and two more over the water sources that provide it to the deposits of *Tecolotlán*. Considering forest cover density, soil texture and the average climate conditions of precipitation, temperature and evapotranspiration, the average rain water infiltration was 3 080, 2 935 and 1 821 m³ ha⁻¹ for the *La Campana*, *Santa Rosa* and *Corralitos* microbasins. The determination of flows registered an average flow of 2 527 L s⁻¹, of which 1 058 L s⁻¹ flowed in the Salto Seco, La Campana and Betania streams; 1 283 L s⁻¹ in *Santa Rosa* river, 186 L s⁻¹ in *Corralitos* streams. The study will help to know the water regime of the streams that partially originates in the mountain range and will precise the recommendations for the good management and use of this resource for the administrative actors and public managers as well as for the users of the natural area and inhabitants of *Tecolotlán*.

Key words: Runoff, evapotranspiration, precipitation, infiltration, soil texture, flow speed.

Fecha de recepción/ date of receipt: 14 de abril de 2014; Fecha de aceptación/date of acceptance: 10 de junio de 2014.

¹ Departamento de Producción Forestal, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Correo-e: vgr02072@cucba.udg.mx

² Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.

³ Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara

INTRODUCCIÓN

La hidrología forestal se ocupa del estudio del comportamiento del ciclo del agua bajo el ámbito de los ecosistemas forestales, así como de las dinámicas en el mismo a partir de sus condiciones y sus variantes dentro de estos ecosistemas, producto de su manejo (uso, restauración o extracción de recursos) (INAB, 2005). Su estudio se origina a partir de los diversos roles que han sido atribuidos al bosque, entre los cuales destaca el efecto “esponja hídrica”, que consiste en reducir la escorrentía proveniente de la precipitación durante el invierno, y mantener los caudales en el verano (agua proveniente de los mantos acuíferos). Según Benfelt (2000 citado por INAB, 2005), “recarga” es el nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un reservorio natural. Lo anterior ocurre cuando la lluvia se filtra a través del suelo o roca. La deforestación y posterior cambio de uso del suelo de los terrenos de aptitud forestal disminuye la capacidad de infiltración.

Las cuencas son fundamentales como unidades de planeación y gestión ambiental, ya que tienen límites claramente definidos y todas las actividades humanas que se llevan a cabo dentro de ellas repercuten sobre el recurso agua (Cruz, 2003), además de desempeñar otras funciones hidrológicas, ecológicas y socioeconómicas; asimismo para valorar esos servicios se deben tomar en cuenta aspectos relacionados con su delimitación, calidad, regulación y protección; la cuantificación de los corrientes de agua, vegetación, uso y erosión del suelo.

La Sierra de Quila es reconocida por contener una gran biodiversidad y regímenes hidrológicos importantes, ya que es el parteaguas de dos regiones del estado de Jalisco (Región Río Ameca, al norte y al sur y Región del Río Armería-Coahuayana), lo que le da una gran relevancia ecológica al área a nivel regional y estatal (SARH, 1993); los afluentes de la parte norte abastecen al río Grande mientras que los de la parte sur vierten al río Tecolotlán - Atengo (río Armería). Los que nacen en la parte alta de la sierra, como los ríos La Campana y Santa Rosa y el arroyo Corralitos son permanentes y de gran relevancia, ya que abastecen de agua al poblado de Tecolotlán. El objetivo del presente estudio consistió en estimar la infiltración por lluvias y evaluar el caudal de las corrientes naturales de tres microcuencas del área protegida Sierra de Quila por un año (2012-2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila (APFFSQ) y su zona de influencia, que se localiza entre 20°14' y 20°22' N y 103°56' y 104°08' O, en el occidente del estado de Jalisco. El clima predominante es templado subhúmedo y semicálido subhúmedo (García, 1973); la precipitación pluvial promedio es de 882 mm, con una temperatura media anual de 20.6 ± 6.5 °C; el mes más

INTRODUCTION

Forest hydrology focuses on the study of the behavior of the water cycle under the forest ecosystem scope as well as the dynamics in it from their conditions and variations within these ecosystems, as a result of their management (use, restoration or extraction of resources) (INAB, 2005). Its study comes from the several roles that have been attributed to the woods, among which the “water sponge” stands out, which consists on reducing the flow from rain fall during winter and keep the water level in summer (water that comes from the ground) According to Benfelt (2000 quoted by INAB, 2005), “reload” is the name given to the process that allows that water supplies a natural reservoir. This happens when rainfall infiltrates through the ground or rock. Deforestation and its later land use change from their forest suitability diminishes the infiltration ability.

Basins are basic as planning and environmental management unit, since they have clearly defined limits and all the human activities that take place within them, affect water (Cruz, 2003), in addition to have other hydrological, ecological, and socio-economic functions; also, in order to assess these services, related aspects must be taken into account in terms of limits, quality, regulation and protection; the quantification of water flow, vegetation, use and soil erosion.

Sierra de Quila is acknowledged for containing a great biodiversity and important hydrology, since it is a watershed of two regions of Jalisco (*Ameca* river Region, to the north and *Armería-Coahuayana* river Region to the south), which gives a great ecological weight to the area, at a regional and state scope (SARH, 1993); the tributaries of the north supply the *Grande* river, while those of the south flow into the *Tecolotlán - Atengo* river (*Armería* river). Those who start in the high part of the mountain range such as *La Campana* and *Santa Rosa* rivers and the *Corralitos* stream are permanent and very relevant, since they provide water to *Tecolotlán*. The aim of this study was to estimate the infiltration from rainfall and to assess the natural flows of three microbasins of *Sierra de Quila* protected area in a year (2012-2013).

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in *Sierra de Quila* Flora and Wildlife Protected Area (APFFSQ) and its zone of influence, that is located between 20°14' - 20°22' N and 103°56' - 104°08' W at the western part of the state of Jalisco. The prevailing weather is subhumid temperate and semihumid semiwarm (García, 1973); average rain is 882 mm and 20.6 ± 6.5 °C as average annual temperature; the coldest month is January and June the warmest (Ruíz *et al.*, 2004). APFFSQ gathers six types of vegetation: Pine-Oak Forest, Oak Forest, Low Deciduous Tropical Forest, Thorn Forest, Gallery Forest and Cloud Mountain Forest (Flores *et al.*, 2013).

frío corresponde a enero y el más cálido a junio (Ruíz *et al.*, 2004). El APFFSQ reúne seis tipos de vegetación: el bosque de Pino-Encino, el bosque de Encino, la Selva Baja Caducifolia, el bosque Espinoso, el bosque de Galería y el bosque Mesófilo de Montaña (Flores *et al.*, 2013).

La Sierra de Quila es un parteaguas que, junto a su zona de influencia, aporta a dos sistemas fluviales del estado de Jalisco; al norte la región hidrológica Río Ameca (RH14A) y al sur la región del Río Armería-Coahuayana (RH16B). Al interior del área natural se originan varias microcuencas, de las cuales destacan nueve con ríos y arroyos permanentes, que abastecen de agua a las poblaciones colindantes. El área específica de estudio comprende las microcuencas de los ríos La Campana y Santa Rosa, así como la microcuenca del arroyo Corralitos, ubicadas en la parte centro-suroeste del APFFSQ, descienden por el valle de Tecolotlán y en particular proveen de agua a la cabecera municipal (Figura 1).

La delimitación de las microcuencas y el cálculo de las características hidrométricas de los arroyos se realizaron sobre un archivo *raster* del modelo de elevación del terreno (MET) con ancho de celda de 20 m, elaborado a partir de datos vectoriales de curvas de nivel a escala 1:50 000 de las cartas topográficas F13D73, F13D74, F13D83 y F13D84 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1999b). Se utilizó el software ArcMap 9.3 (ESRI, 2008) con las herramientas 3D y *Spatial Analyst*. La delimitación de las microcuencas se obtuvo a partir del MET con la extensión HEC-Geo HMS v. 4.2 (Flemming y Doan, 2009) con el criterio de identificar superficies no menores a 1 000 ha.

Para la medición del caudal natural de los arroyos se establecieron siete sitios fijos sobre el flujo de la corriente y dos más en lugares de canalización y almacenamiento de agua. La ubicación de los sitios de medición del gasto hídrico buscó cubrir de manera sistemática la red principal de drenaje de cada microcuenca, esto es, que a partir de la zona alta se designaron sitios sobre los arroyos tributarios permanentes y su cauce principal (S1, S2 y S4), así como en la parte media (S3, S5 y S7) y en la parte baja como punto de unión de las tres microcuencas (S8) (Figura 1); asimismo, se establecieron sitios de medición del caudal de manera directa en los lugares con infraestructura para la distribución de agua, administrados por el ayuntamiento de Tecolotlán (S6 y S9). Todos los sitios establecidos sobre los arroyos y ríos se caracterizaron por encontrarse en fragmentos rectos del caudal, por tener poca pendiente y un ancho de cauce promedio, sin venidas de agua cercanas (desniveles o pequeñas cascadas), y tener un entorno de vegetación homogénea. El monitoreo del agua se programó de manera quincenal durante un año (mayo de 2012 a mayo de 2013).



Sierra de Quila is a watershed that, together with its zone of influence, supplies to two fluvial systems of Jalisco state; to the north, the Ameca River (RH14A) hydrological region; to the south, the Armería-Coahuayana river (RH16B) region. Inside the natural area, several microbasins are formed, of which nine rivers and permanent brooks are outstanding, which supply water to the neighboring communities. The specific study area includes the La Campana and Santa Rosa river microbasins, as the Corralitos stream microbasin, located at the central-southwestern part of the APFFSQ, which go down by the Tecolotlán valley and particularly, provide water to the municipal head (Figure 1).

Setting the limits of the microbasins and the determination of the hydrometric characteristics of the streams was made over a raster archive of the ground elevation model (MET, for its acronym in Spanish), with a cell width of 20 m, made from the vectorial data of level curves of the F13D73, F13D74, F13D83 and F13D84 topographic maps at a 1:50 000 scale of the Statistics, Geography and Informatics National Institute (INEGI, for its acronym in Spanish) (INEGI, 1999b). The ArcMap 9.3 software was used (ESRI, 2008) with the 3D and Spatial Analyst tools. The delimitation of the microbasins was obtained from MET with the HEC-Geo HMS v. 4.2 extension (Flemming and Doan, 2009) with the criterion to find areas not below 1 000 ha.

For the measurement of the natural flow of streams, seven permanent sites were settled over the flow and two more in places of channelization and water storage. The location of the sites of water expense measurement sought to cover systematically the main runoff net of each microbasin, that is, that, from the high zone were defined places over the permanent and their main flow (S1, S2 and S4), as well as in the middle part (S3, S5 and S7) and in the low part as a joint point for the three microbasins (S8) (Figure 1); also, some sites were placed to measure directly where there was infrastructure for the distribution of water, managed by the city council of Tecolotlán (S6 and S9). All the sites over the streams and rivers were found in the straight fragments of the flow, for having a small slope and an average flow width, without nearby water flows (drops or small cascades), and having a homogeneous vegetation surroundings. Water monitoring was programed for every 15 days during one year (May 2012 to May 2013).

For the physical determination of infiltration and the analysis of the average annual flow of the microbasins, the indirect Precipitation-flow indirect method of the NOM-011-CNA-2000 Mexican Official Regulation (CNA, 2011) was used. The indirect method demanded the review and previous generation of geo-referred thematic information of the biophysical environment of the study area. In order to get a map with K values, in terms of type and soil use, edaphological maps were digitalized from the F13D73, F13D74, F13D83 and F13D84 maps of INEGI at 1:50000 scale (INEGI, 1999a), and thus, to have a stratified vegetation map by cover density (<25 %, >25 %, >50 %).

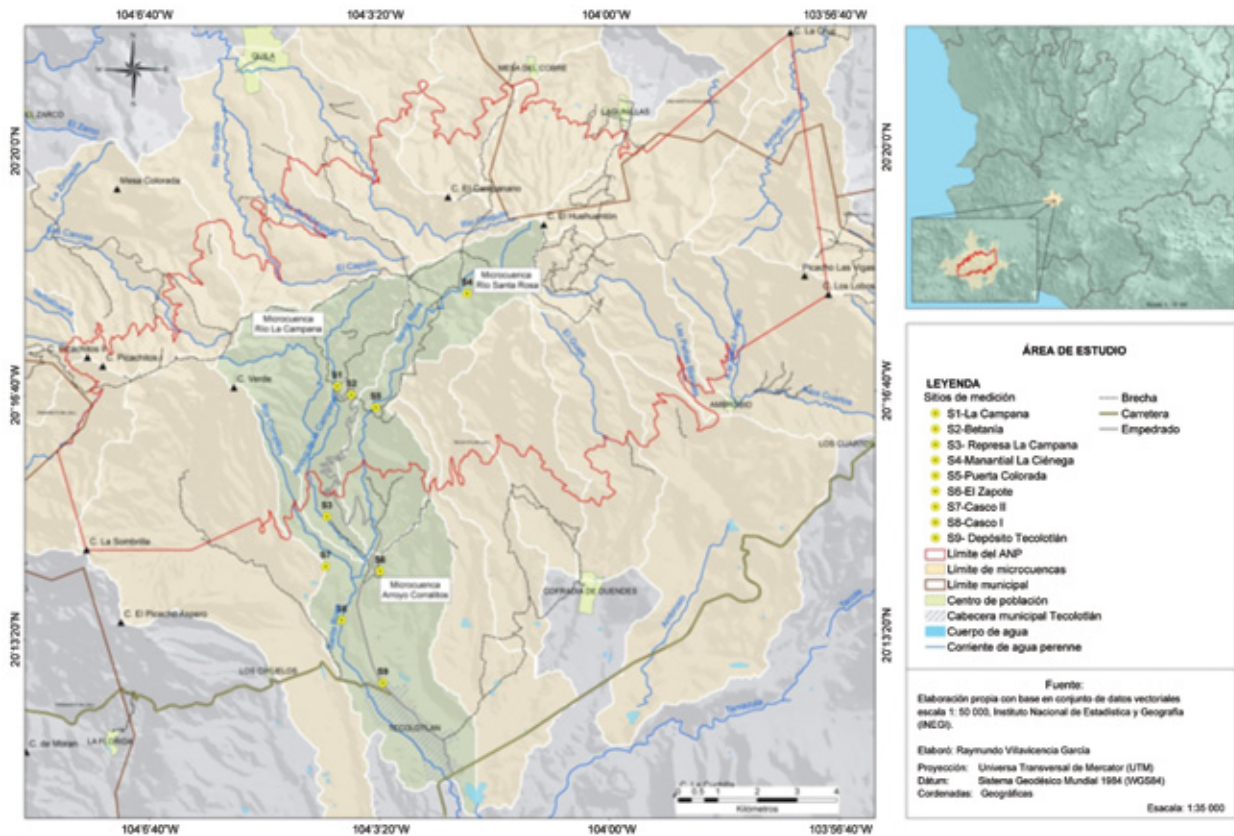


Figura 1. Localización del Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila y delimitación de las microcuencas de los ríos La Campana, Santa Rosa y arroyo Corralitos.

Figure 1. Location of the Sierra de Quila Flora and Wildlife Protected Area (APFFSQ) and delimitation of the microbasins of the La Campana and Santa Rosa rivers, and the Corralitos stream.

Para el cálculo físico de la infiltración y análisis del volumen medio anual de escurrimiento de las microcuencas, se utilizó el método indirecto Precipitación-Escurrecimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (CNA, 2011). El método indirecto requirió de la recopilación y generación previa de información temática georreferenciada del medio biofísico correspondiente al área de estudio. Con el fin de obtener un mapa de valores de K, en función del tipo y uso del suelo, se digitalizaron mapas edafológicos de las cartas F13D73, F13D74, F13D83 y F13D84 del INEGI a escala 1:50000 (INEGI, 1999a); para obtener una carta de vegetación estratificada por densidad de cobertura (<25 %, 25-50 %, 50-75 % y >75 %) y otros usos de suelo. Una ortofotografía color-infrarrojo del año 2004 se interpretó y digitalizó a escala 1:5 000. Por último, se contó con capas digitales sobre la precipitación y temperatura promedio anual; los mapas fueron modelados por Ruiz *et al.* (2004) a partir de datos climatológicos de 40 años (1960-2000) para la clasificación climática del estado de Jalisco. Toda las capas se homogeneizaron en formato *raster*; posteriormente, con la función cálculo de mapas de ArcMap 9.3, se realizaron operaciones algorítmicas para obtener modelos digitales del valor de K a partir del tipo y uso del

25-50 %, 50-75 % and >75 %) and other land use. A 2004 orthophotography was interpreted and digitalized at a 1:5 000 scale. Finally, digital layers on average annual precipitation and temperature were used; maps were modelled by Ruiz *et al.* (2004) from climatological data from 40 years (1960-2000) for the climatic classification of the state of Jalisco. All the layers were homogenized in raster format; then, with the calculation function of the ArcMap 9.3 maps, algorithmic operations were performed to obtain digital models of the K value from the type and land use, evapotranspiration (Turc method), runoff (Ce) and net infiltration (In).

The calculus of the expense that conducts the water flow of the streams and rivers was determined with the Speed-section method, which let to estimate the hydraulic area of the section, as well of the continuation equation:

$$Q = V A$$

Where:

Q = Expense ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

A = Area of the section (m^2)

V = Speed (m s^{-1})

suelo, evapotranspiración (método de Turc), escurrimiento (Ce) e infiltración neta (In).

El cálculo del gasto que conduce la corriente de agua de los arroyos y ríos se determinó con el método "Sección-velocidad", el cual conlleva a estimar el área hidráulica de la sección, además de la ecuación de continuidad:

$$Q = V A$$

Donde:

Q = Gasto ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

A = Área de la sección (m^2)

V = Velocidad (m s^{-1})

$$A = d \left(\frac{he1}{2} + \sum h_i + \frac{he2}{2} \right)$$

Donde:

A = Área hidráulica de la sección (m^2)

d = Ancho de las porciones (cm o m)

$h_1, \dots, h_n$ = Alturas intermedias (m)

$he1, he2$ = Alturas extremas medidas sobre el talud de la sección (m)

$\sum h_i$ = Suma de alturas intermedias (m)

$$V = \frac{l}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}$$

Donde:

V = Velocidad del flujo (m s^{-1});

n = Número de registro de tiempos

$t_1, \dots, t_n$ = Tiempo que tarda flotador en recorrer un transecto sobre el caudal (m s^{-1})

l = Longitud del transecto (m)

$\sum t_i$ = Suma de tiempos (m s^{-1})

Para medir la velocidad del flujo de los arroyos se utilizó un dispositivo mecánico (flotador), que consiste en un objeto emergente simple o de superficie que adquiere la velocidad del agua que lo circunda; con el fin de reducir errores aleatorios y mejorar la calidad de la medición, se promedió el flujo de cada caudal con cinco repeticiones. Por otro lado, el método de medición directa se utilizó para los sitios con infraestructura (caja de agua y depósitos).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del modelo de elevación del terreno se obtuvo la delimitación de 24 microcuencas tributarias que intersectan con el polígono del área natural protegida Sierra de Quila y su zona de influencia. La microcuenca del río La Campana abarca una superficie de 15.8 km^2 (1 576.6 ha), tiene una elevación

$$A = d \left(\frac{he1}{2} + \sum h_i + \frac{he2}{2} \right)$$

Where:

A = Hydraulic area of the section (m^2)

d = Width of the portions (cm or m)

$h_1, \dots, h_n$ = Intermediate heights (m)

$he1, he2$ = Extreme heights measured over the slope of the section (m)

$\sum h_i$ = Sum of in-between heights (m)

$$V = \frac{l}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}$$

Where:

V = Flow speed (m s^{-1})

n = Number of the time record

$t_1, \dots, t_n$ = Time that delays the floater in going through a transect over the flow

l = Transect length (m)

$\sum t_i$ = Sum of times (m s^{-1})

A mechanical devise was used (floater) to measure the flow speed of the streams, which is an emergent object, simple or of surface, that gets the speed of water that surrounds it; in order to reduce errors at random and improve the quality of measurements, the average of the flow of each flow rate with five replications was made. On the other hand, the direct measurement method was used for the sites with infrastructure (water box and deposits).

RESULTS AND DISCUSSION

From the model of elevation of land was obtained the delimitation of 24 tributary microbasins that intersect with the polygonal of the natural protected area of *Sierra de Quila* and its zone of influence. The microbasin of *La Campana* river includes an area of 15.8 km^2 (1 576.6 ha), its average elevation is 1 679 m and a slope of 19.5 %. The main flow is nine km long and a concentration time of 51 minutes. The microbasin of *Santa Rosa* river, in its geometric context, covers 14.9 km^2 (1 486.9 ha), has an average elevation and slope of 1 857 m and 14.1 %; its main flow is 10.8 km long with a concentration time of 56 minutes. Finally, the *Corralitos* stream microbasin covers 19.6 km^2 (1 957.1 ha); its average elevation and slope are 1 502 m and 10.1 %. Its main flow is 11.7 km and a concentration time of 69 minutes (Table 1).

The morphometry of the microbasins, according to the compactness coefficient (K_c), suggests that the three areas are long or oblong oval to oblong rectangular, but the *Corralitos* stream one is the most irregular (2.6) (Table 1). According to the obtained values of the shape factor (K_f), the three microbasins are little

media de 1 679 m y una pendiente de 19.5 %. El cauce principal tiene una longitud de nueve kilómetros y un tiempo de concentración de 51 minutos. La microcuenca del río Santa Rosa en su contexto geométrico cubre una superficie de 14.9 km² (1 486.9 ha), registra una elevación y pendiente media de 1 857 m y 14.1 %; su cauce principal tiene una longitud de 10.8 km con un tiempo de concentración de 56 minutos. Por último, la microcuenca del arroyo de Corralitos cubre una superficie de 19.6 km² (1 957.1 ha); posee una elevación y pendiente media de 1 502 m y 10.1 %. Su cauce principal es de 11.7 km con un tiempo de concentración de 69 minutos (Cuadro 1).

La morfometría de las microcuencas, según el coeficiente de compacidad (Kc), sugiere que las tres áreas son alargadas o bien, de oval oblongas a rectangular oblonga, sin embargo la microcuenca del arroyo Corralitos es la más irregular (2.6) (Cuadro 1). De acuerdo a los valores obtenidos del factor de forma (K_f), las tres microcuencas son muy poco achatadas, es decir, son menos tendientes a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa y formar fácilmente grandes crecidas (Cuadro 1). Los valores de la densidad de drenaje (D_d) para las microcuencas de los ríos La Campana y Santa Rosa resultaron de 3.3 y 3.1 km km⁻², lo que sugiere una densidad de drenaje moderada; la microcuenca del arroyo Corralitos presentó una densidad baja (1.9), y a esta última corresponden los volúmenes de escurrimiento bajos, al igual que velocidades menores de desplazamiento de las aguas. La densidad de corrientes para las microcuencas de los ríos La Campana y Santa Rosa fue de 4 arroyos km⁻², por lo que se considera como un drenaje eficiente (INE, 2004) (Cuadro 1).

flattened, that is, are less tending to concentrate runoffs from an intense rainfall and easily form great rises (Table 1). The values of drainage density (D_d) were 3.3 and 3.1 km km⁻², which suggests a mild drainage density; the *Corralitos* stream microbasin had a low density (1.9) and to the latter belong the low runoff volumes, as well as the slow water displacement speeds. The flow density for the *La Campana* and *Santa Rosa* river microbasins was 4 streams km⁻² which suggests an efficient drainage (INE, 2004) (Table 1).

The hierarchization of the complex drainage net of the microbasins was determined with the Strahler (1957) method; the degree of the net structure of the microbasins of the *La Campana* and *Santa Rosa* basins is high (four orders) which suggests a greater drainage net and a defined structure. Conversely, the class of order in the *Corralitos* stream microbasin is medium as it only has a three order range (Table 2).

The type of soil and vegetation accomplish a very important function in the estimation of the annual runoff coefficient (Ce) and net infiltration (IN); once the soils was classified in three different types: permeable soil, half permeable and almost permeable, taking into account its actual use; the corresponding K value is obtained, which is weighted by the different types of vegetation and land use. Table 3 shows the absolute and relative by type and land use by microbasin; those of *La*



Cuadro 1. Parámetros morfométricos e hidrológicos por microcuenca.

Parámetros	MRC	MRSR	MAC
Morfométricos			
Compacidad de Gravelius (Kc)	2.1	2.5	2.6
Factor de forma (K _f)	0.20	0.13	0.14
Hidrológicos			
Número total de corrientes	67	60	32
Longitud de cauce principal (m)	8914	10826	11695
Densidad de drenaje (D _d) (km m ⁻²)	3.3	3.1	1.9
Densidad de corrientes (arroyos km ⁻²)	4	4	2
Tiempo de concentración (min)	51	56	69

MRC= río La Campana; MRSR= río Santa Rosa; MAC= arroyo Corralitos.



Table 1. Morphometric and hydrological parameters by microbasin.

Parameters	MRC	MRSR	MAC
Morphometrics			
Gravelius compacity (K_c)	2.1	2.5	2.6
Shape factor (K_f)	0.20	0.13	0.14
Hydrological			
Total number of flows	67	60	32
Length of the main flow (m)	8914	10826	11695
Drainage density (D_d) (km km^{-2})	3.3	3.1	1.9
Flow density (streams km^{-2})	4	4	2
Concentration time (min)	51	56	69

MRC = La Campana river; MRSR = Santa Rosa river; MAC = Corralitos stream.

La jerarquización de la compleja red de drenaje de las microcuencas se determinó con el método de Strahler (1957); el grado de estructura de la red para las microcuencas de los ríos La Campana y Santa Rosa es alto (cuatro órdenes) por lo que sugiere una red de drenaje mayor y de estructura definida. Por el contrario, la clase de orden en la microcuenca del arroyo Corralitos es media al presentar solo un intervalo de tres órdenes (Cuadro 2).

Campana and Santa Rosa rivers have a forest cover of 92 and 98 %, made up, mainly by pine-oak forest, oak forest and deciduous low tropical forest. The forest area in both is dense, since 73 and 86 % have a cover density over 75 %; opposite to this, that of Corralito stream has only 30 % of the land covered by deciduous low tropical forest, 57 % is intended to agriculture and livestock and the resting 13 % is occupied by Tecolotlán town (Table 3).

Cuadro 2. Orden de corrientes por microcuenca.

Orden	MRC		MRSR		MAC	
	Núm.	Longitud (km)	Núm.	Longitud (km)	Núm.	Longitud (km)
Primero	52	28.9	48	28.7	25	18.9
Segundo	11	10.0	7	2.9	5	13.3
Tercero	3	7.4	4	5.6	2	5.5
Cuarto	1	4.8	1	8.3	-	-
Total	67	51.2	60	45.6	32	37.7

MRC = río La Campana; MRSR = río Santa Rosa; MAC = arroyo Corralitos.

Table 2. Flow order by microbasin.

Order	MRC		MRSR		MAC	
	No.	Length (km)	No.	Length (km)	No.	Length (km)
First	52	28.9	48	28.7	25	18.9
Second	11	10.0	7	2.9	5	13.3
Third	3	7.4	4	5.6	2	5.5
Fourth	1	4.8	1	8.3	-	-
Total	67	51.2	60	45.6	32	37.7

MRC = La Campana river; MRSR = Santa Rosa river; MAC = Corralitos stream.

El tipo de suelo y la vegetación cumplen una función muy importante en la estimación del coeficiente de escurrimiento anual (Ce) e infiltración neta (IN); una vez categorizado el suelo en tres diferentes tipos: suelo permeable, medianamente y casi impermeable, tomado en cuenta su uso actual; se obtiene el valor de K correspondiente, el cual se pondera por los diferentes tipos de vegetación y usos del suelo. El Cuadro 3 muestra los valores absolutos y relativos por tipo y usos del suelo por microcuenca; las de los ríos La Campana y Santa Rosa poseen una cubierta forestal de 92 y 98 %, compuesta principalmente por bosque de pino-encino, bosque de encino y selva baja caducifolia. La superficie forestal en ambas es densa, ya que 73 y 86 % tienen una densidad de cobertura mayor a 75 %; por el contrario, la del arroyo Corralitos solo tiene 30 % de su superficie cubierta de selva baja caducifolia, 57 % se destina al uso agrícola y pecuario y 13 % restante lo ocupa la superficie del poblado de Tecolotlán (Cuadro 3).

The capacity of rainfall water natural catchment directly depends on the extent of the microbasin and the annual average precipitation that is deposited in it; the water availability coefficient for the *La Campana* river microbasin was determined as 13.9 Mm³ year⁻¹, that of *Santa Rosa*, 13 Mm³ year⁻¹ and *Corralitos*, 16.4 Mm³ year⁻¹. Microbasins are potable water sources for *Tecolotlán*, as they provide it to its inhabitant for regular use, while the stream of the *Corralitos* microbasin distributes its water that comes from a perennial spring to some plots of agriculture and livestock use located at the northwest of the municipal head.

To the microbasins of the *La Campana* and *Santa Rosa* rivers and of the *Corralitos* stream was determined a weighted runoff coefficient of 0.06, 0.05 and 0.14 (Table 4); and when precipitation and the drained area are included, it produces an average runoff volume of 0.83, 0.65 and 2.29 Mm³ year⁻¹.

Cuadro 3. Tipo de vegetación por densidad de cobertura (%) y otros usos del suelo por microcuenca.

Tipo de vegetación y otros usos del suelo	MRC		MRSR		MAC	
	Sup. (ha)	Sup. (%)	Sup. (ha)	Sup. (%)	Sup. (ha)	Sup. (%)
Bosque cobertura < a 25 %	63.5	4	52.5	4	48.9	2
Bosque cobertura 25 al 50 %	311.7	20	36.5	2	150.8	8
Bosque cobertura 50 al 75 %	8.5	1	0.5	0	31.4	2
Bosque cobertura > a 75 %	1152.0	73	1278.7	86	353.1	18
Camino	13.9	1	7.9	1	7.1	0
Cultivo	8.3	1	40.2	3	1023.6	52
Pastizal cobertura < a 50 %	12.2	1	61.2	4	26.9	1
Pastizal cobertura 50 al 75 %	1.0	0	7.9	1	-	-
Pastizal cobertura > a 75 %	0.9	0	-	-	68.9	4
Zona urbana	-	-	0.2	0	246.5	13
Área desprovista de vegetación	4.5	0	1.2	0	-	-
Total	1576.6		1486.9		1957.1	

MRC= río La Campana; MRSR= río Santa Rosa; MAC= arroyo Corralitos; Sup. = superficie.

Table 3. Type of vegetation by cover density (%) and other land uses by microbasin.

Type of vegetation and other land uses	MRC		MRSR		MAC	
	Sup. (ha)	Sup. (%)	Sup. (ha)	Sup. (%)	Sup. (ha)	Sup. (%)
Forest cover <25 %	63.5	4	52.5	4	48.9	2
Forest cover 25 to 50 %	311.7	20	36.5	2	150.8	8
Forest cover 50 to 75 %	8.5	1	0.5	0	31.4	2
Forest cover >75 %	1152.0	73	1278.7	86	353.1	18
Road	13.9	1	7.9	1	7.1	0
Crop	8.3	1	40.2	3	1023.6	52
Grassland cover <50 %	12.2	1	61.2	4	26.9	1
Grassland cover 50 to 75 %	1.0	0	7.9	1	-	-
Grassland cover >75 %	0.9	0	-	-	68.9	4
Urban Zone	-	-	0.2	0	246.5	13
Area without vegetation	4.5	0	1.2	0	-	-
Total	1576.6		1486.9		1957.1	

MRC = *La Campana* river; MRSR= *Santa Rosa* river; MAC= *Corralitos* stream; Sup. = surface

La capacidad de captación natural de agua de lluvia depende directamente de la extensión de la microcuenca y la precipitación promedio anual que en ésta se deposita; el coeficiente de disponibilidad de agua para la microcuenca del río La Campana se calculó en $13.9 \text{ Mm}^3\text{año}^{-1}$, Santa Rosa en $13 \text{ Mm}^3\text{año}^{-1}$ y Corralitos en $16.4 \text{ Mm}^3\text{año}^{-1}$. Las microcuencas son fuente de agua potable para la población de Tecolotlán, ya que suministran este recurso a sus habitantes para el uso común, mientras que el arroyo de la microcuenca Corralitos distribuye su agua proveniente de un manantial perenne a algunas parcelas de uso agropecuario situadas en la parte noroeste de la cabecera municipal.

A las microcuencas de los ríos La Campana, Santa Rosa y arroyo Corralitos se les determinó un coeficiente de escurrimiento ponderado de 0.06, 0.05 y 0.14 (Cuadro 4); y al considerar la precipitación y el área drenada, en volumen, se traduce en un escurrimiento medio de 0.83, 0.65 y $2.29 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$.

La Figura 2 muestra las zonas de escurrimiento en un intervalo de cinco clases, a partir de cero, la cual podría considerarse la clase como de bajo escurrimiento; la zona de mayor escurrimiento de la microcuenca del río La Campana se sitúa en el paraje reconocido como Cuatro Caminos, es una de las intersecciones más importantes de la red de caminos del área protegida, su entorno arbóreo denota un bosque abierto de pino - encino y una alta degradación del sotobosque y del suelo de tipo Cambisol húmico, semipermeable y de textura fina. La microcuenca del río Santa Rosa presenta en su parte media - alta un paraje, La Ciénega, con un intervalo de escurrimiento entre 148.2 y $177.5 \text{ mm año}^{-1}$; este paraje es una zona húmeda y plana donde existe mantos de agua; su nivel freático es horizontal y muy cercano al suelo. Este nivel se localiza en la zona de saturación y cuando aflora a la superficie, surge la escorrentía (Duque, 2003).

El suelo que predomina en La Ciénega es el Leptosol, se caracteriza por ser un suelo endurecido, poco profundo, permeable y de textura media; sin embargo al encontrarse las aguas subterráneas tan cerca a la superficie, se supera la capacidad de infiltración del suelo y por ende aumenta el factor de escurrimiento. La microcuenca del arroyo Corralitos delimita su área de mayor escurrimiento sobre el poblado de Tecolotlán, la mayor superficie cubierta por infraestructura. Las microcuencas La Campana, Santa Rosa y Corralitos arrojaron por modelación una capacidad de infiltración de agua de lluvia promedio de $3\,080$, $2\,935$ y $1\,821 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Cuadro 4); la Figura 3 muestra las sitios de infiltración que ocurren de forma inversa al mapa de escurrimiento; esto es, que aquellos territorios de bajo escurrimiento son los de mayor infiltración.

Cruz *et al.* (2011) estimaron los volúmenes del sistema hidrológico de la cuenca de La Paz, Baja California Sur, al utilizar la ecuación general del balance hidrológico aplicada

Figure 2 shows the runoff zones in a range of five clases, starting from zero, which could be considered that of low runoff; the zone of highest runoff of the *La Campana* river microbasin is located in the spot known as *Cuatro Caminos* (Four Roads), which is one of the most important intersections of the road net of the protected area. Its tree surroundings defines an open pine-oak forest and a high undergrowth and humic cambisol soil type degradation which is semipermeable and fine textured. *Santa Rosa* river microbasin has a spot known as *La Ciénega* in its medium-high part, with a runoff range between 148.2 and $177.5 \text{ mm year}^{-1}$; this spot is a humid and flat zone where there are water bodies; its phreatic level is horizontal and very close to the ground. This level is found in the saturation zone and when it gets to the surface, runoff appears (Duque, 2003).

Leptosol is the type of soil that prevails in *La Ciénega*, and it is hardened, shallow, permeable and of medium texture; however, when it is found in the underground water so close to the surface, the soil infiltration ability is surpassed, and, consequently, it increases de runoff factor. The *Corralitos* stream microbasin defines its greatest runoff area over *Tecolotlán*, the greatest covered by infrastructure. *La Campana*, *Santa Rosa* and *Corralitos* microbasins revealed, by modeling, an average infiltration of rainfall water of $3\,080$, $2\,935$ and $1\,821 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Table 4); Figure 3 shows the infiltration areas that occur inversely to the runoff map; that is, that those of low runoff have the greatest infiltration.

Cruz *et al.* (2011) estimated the volumes of the hydrological system of *La Paz* basin, in South Baja California, by using the general equation of water balance applied to a Geographical Information System (GIS); with climatic data of 25 years (1980-2004) they generated models of precipitation, temperature, evapotranspiration, runoff and reload. With a precipitation of $410 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$ determined an average runoff of $15 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$ and of infiltration of $65 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$; the latter occurs in the *El Novillo* sub-basin, the main reload zone, which is due to the Surface and is located over alluvial soil deposits, fractured intrusive igneous and intemperized rocks. As in the study of Cruz *et al.* (2011), there are several works that focus on the modeling of the hydrological basin system, at a small and big scale (Martínez, 2001; Treviño *et al.*, 2002; Posner *et al.*, 2003;



a un sistema de información geográfica (SIG); con datos climatológicos de 25 años (1980-2004) generaron modelos de precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimiento y recarga. Con una precipitación de $410 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ determinaron un escurrimiento promedio de $15 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ y de infiltración de $65 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$; esta última sucede en la subcuenca El Novillo, principal zona de recarga, debido al tamaño de su superficie y ubicarse sobre depósitos de suelo aluvial, rocas ígneas intrusivas fracturadas e intemperizadas. Al igual que el trabajo de Cruz *et al.* (2011), son diversos los estudios enfocados a la modelación del sistema hidrológico en cuencas hidrográficas, a pequeña y gran escala (Treviño *et al.*, 2002; Posner *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2012; González *et al.*, 2013; Suárez *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2013); un aspecto que destaca entre ellos es que en cada espacio físico confluyen diferentes fenómenos y procesos implicados en la interacción tierra - agua. Esa complejidad de procesos sugiere la necesidad de métodos de evaluación que van desde la descripción hasta el uso de modelos detallados y específicos de enfoque integrado y participativo (FAO, 2000).

Díaz *et al.*, 2012; González *et al.*, 2013; Suárez *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2013); an outstanding aspect in them is that in each physical space converge different phenomena and processes implied in the water-soil interaction. This complexity of processes suggests the need of assessment methods that include description and go as far as the use of detailed and specific models of integrated and participative focus (FAO, 2000).

Figure 4 interprets the network of natural streams, flow measurement sites, catchments (dams and breaker), pipeline networks and water distribution. The sum of the three microbasins flow yielded a total flow of $2\,527 \text{ L s}^{-1}$ during the period from May 2012 to May 2013; the highest average monthly flow was recorded during August 2012 with 442.3 L s^{-1} ; on the contrary, the lowest runoff was presented in April 2013 to 71.1 L s^{-1} (Table 5). Once the rainstorm started (June 2012), the Santa Rosa river watershed contributed until November, more than 50 % of the flow, and, despite the floods this river might have on other events not registered, the average expenditure remained constant (Table 5).

Cuadro 4. Valores de precipitación promedio anual, coeficiente de escurrimiento, evapotranspiración e infiltración por microcuenca.

Valor	Río La Campana			
	PP (mm)	CE (mm)	ETR (mm)	IN (mm)
Mínimo	838.6	0.0	532.0	150.8
Máximo	899.2	177.1	544.3	355.9
Media	879.7	31.6	540.1	308.0
Desviación estándar	15.1	39.4	2.5	41.7
Río Santa Rosa				
Mínimo	838.5	0.0	531.2	148.7
Máximo	914.2	177.5	541.0	362.2
Media	876.4	45.3	537.6	293.5
Desviación estándar	21.9	42.2	2.7	53.0
Arroyo Corralitos				
Mínimo	825.8	0.0	527.6	120.6
Máximo	895.3	181.7	542.8	305.7
Media	836.2	123.0	531.1	182.1
Desviación estándar	10.0	44.6	2.7	48.4

PP= Precipitación pluvial media anual; CE= Coeficiente de escurrimiento; ETR= Evapotranspiración; IN= Infiltración neta.



Table 4. Annual average precipitation values, runoff coefficient, evapotranspiration and infiltration by microbasin.

Value	<i>La Campana river</i>			
	PP (mm)	CE (mm)	ETR (mm)	IN (mm)
Minimum	838.6	0.0	532.0	150.8
Maximum	899.2	177.1	544.3	355.9
Mean	879.7	31.6	540.1	308.0
Standard deviation	15.1	39.4	2.5	41.7
<i>Santa Rosa river</i>				
Minimum	838.5	0.0	531.2	148.7
Maximum	914.2	177.5	541.0	362.2
Mean	876.4	45.3	537.6	293.5
Standard deviation	21.9	42.2	2.7	53.0
<i>Corralitos stream</i>				
Minimum	825.8	0.0	527.6	120.6
Maximum	895.3	181.7	542.8	305.7
Mean	836.2	123.0	531.1	182.1
Standard deviation	10.0	44.6	2.7	48.4

PP= Annual average precipitation; CE= Runoff coefficient; ETR= Evapotranspiration; IN= Net infiltration

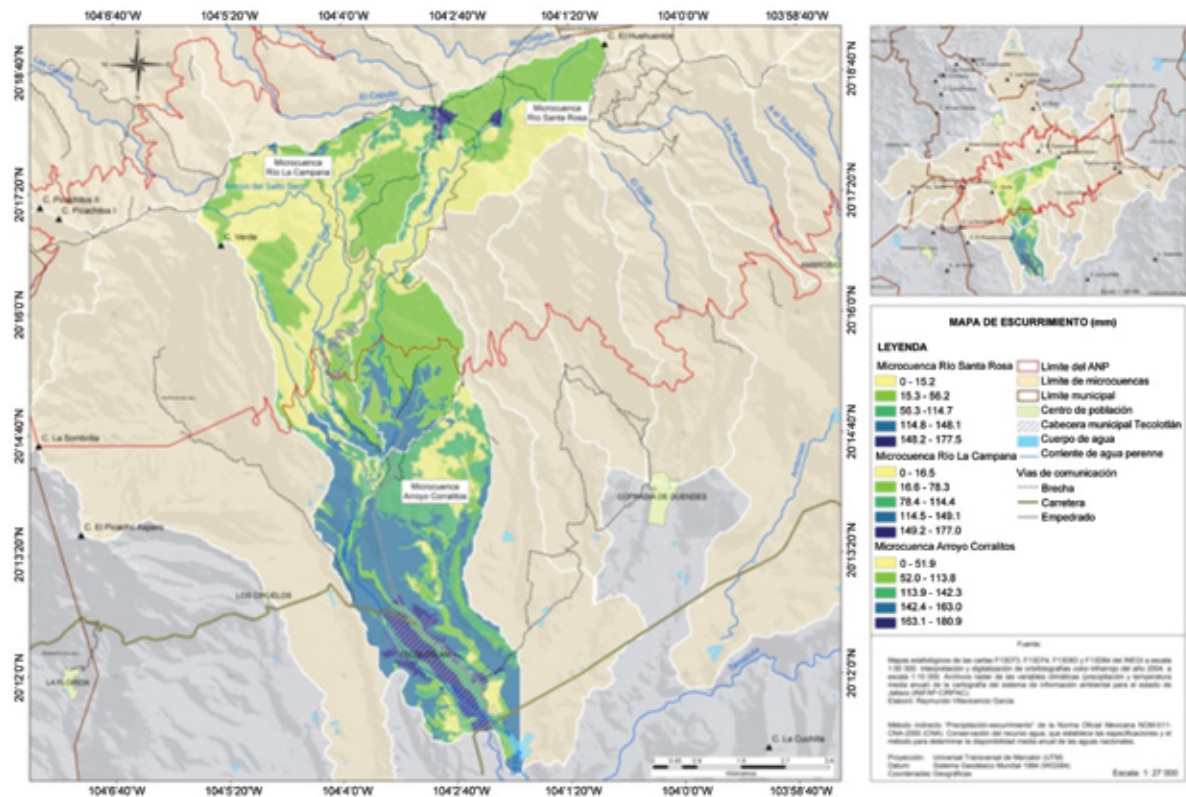


Figura 2. Intervalo de escurrimiento promedio anual (mm) de las microcuencas de los ríos La Campana, Santa Rosa y arroyo Corralitos del área protegida Sierra de Quila y zona de influencia.

Figure 2. Annual average runoff interval (mm) of the *La Campana*, *Santa Rosa* rivers and *Corralitos* stream microbasins of *Sierra de Quila* protected area and zone of influence.

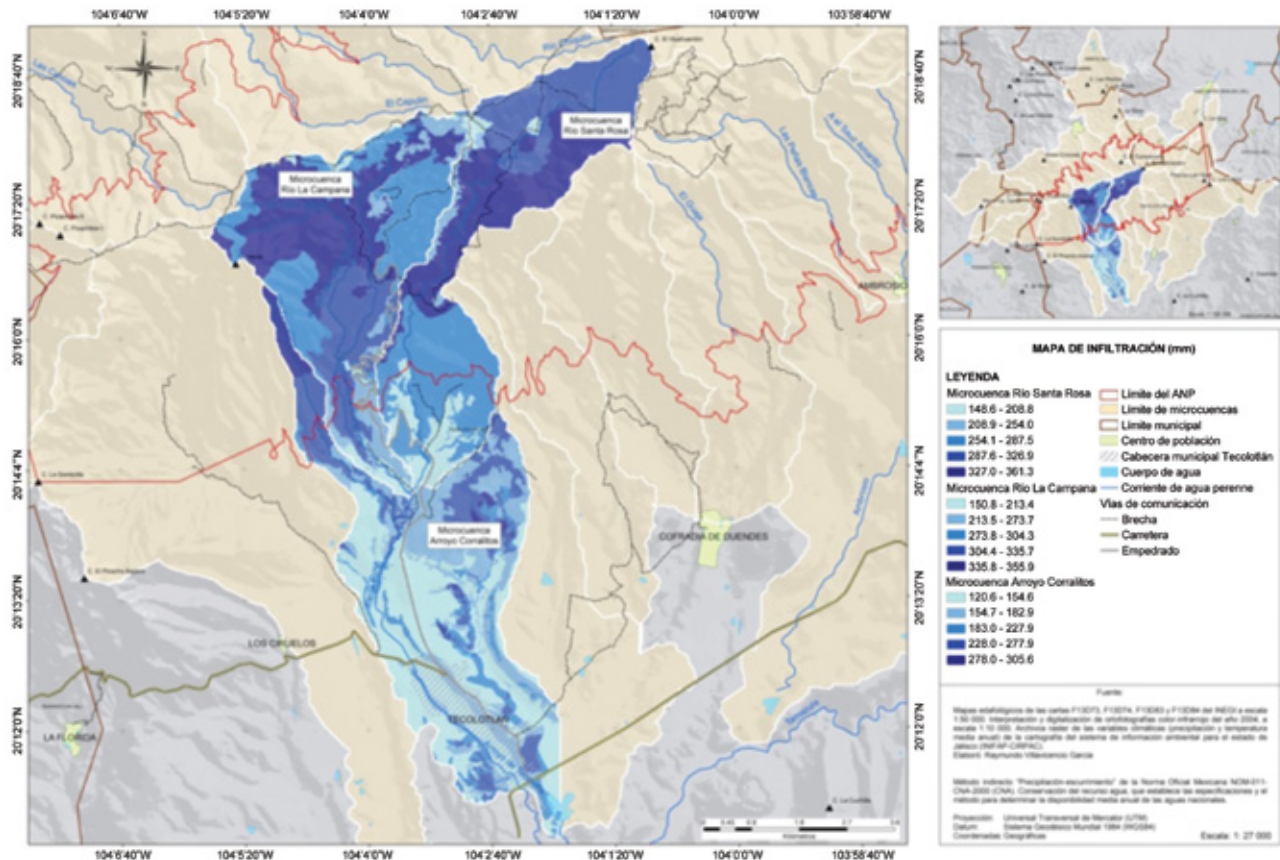


Figura 3. Intervalo de infiltración promedio anual (mm) de las microcuencas de los ríos La Campana, Santa Rosa y arroyo Corralitos del área protegida Sierra de Quila y zona de influencia.

Figure 3. Annual average infiltration interval (mm) of the *La Campana*, *Santa Rosa* rivers and *Corralitos* stream microbasins of *Sierra de Quila* protected area and zone of influence.

La Figura 4 interpreta la red de corrientes naturales, sitios de medición de caudal, zonas de captación (represas y rompedoras), redes de canalización y distribución de agua. La suma del caudal de las tres microcuencas arrojó un flujo total de $2\,527\text{ L s}^{-1}$ durante el período de mayo de 2012 a mayo de 2013; el flujo promedio mensual más alto se registró durante agosto de 2012 con 442.3 L s^{-1} ; por el contrario, el escurrimiento más bajo se presentó en abril de 2013 con 71.1 L s^{-1} (Cuadro 5). Una vez iniciado el temporal de lluvia (junio de 2012), la microcuenca del río Santa Rosa aportó hasta el mes de noviembre más de 50 % del caudal, y, a pesar de las crecidas que este río pudo tener en otros eventos no registrados mantuvo un gasto promedio constante (Cuadro 5).

Las dos microcuencas que abastecen el depósito del poblado de Tecolotlán (S9) son la microcuenca del río La Campana (S3) que aportó, solo durante el período de lluvias (junio - septiembre), un promedio de 133.6 L s^{-1} ; mientras que la del río Santa Rosa (S5 y S6) promedió 171.6 L s^{-1} .

El arroyo de la microcuenca Corralitos (S7) fue el de menor aporte; el arroyo nace de un manantial ubicado en la parte

The two microbasins that nourish the deposits of *Tecolotlán* (S9) are the microbasin of *La Campana* river (S3) that contributed, only during the rainy season (June to September) an average of 133.6 L s^{-1} ; while that of *Santa Rosa* river averaged 171.6 L s^{-1} .

The stream of the *Corralitos* microbasin (S7) had the lowest contribution; it is born from a spring located in the middle of the southern flank of *Cerrito Verde*. It is worth noting that the flow of the river of this microbasin has been changed into a perpendicular natural flow, in order to conduct water to an agriculture and livestock zone; the channel supplies two sides, after which, the exceeding water is infiltrated. Its average expense was 15.5 L s^{-1} and was constant from August 2012 to April 2013 (Table 5 and Figure 5); in May, period of low water, a recovery in the average flow of the microbasins was recorded, since 2013 was the most rainy year since 1941, in spite of being the two previous as the driest years. Jalisco occupied the fifth place as the most humid states (CNA, 2013); at the center-west of the country, in January there were intense rains, while in the following months there were intermittent with some strong rains at the end of May (Figure 5). Another connotation is the "exceeding" volume by microbasin determined in regard to

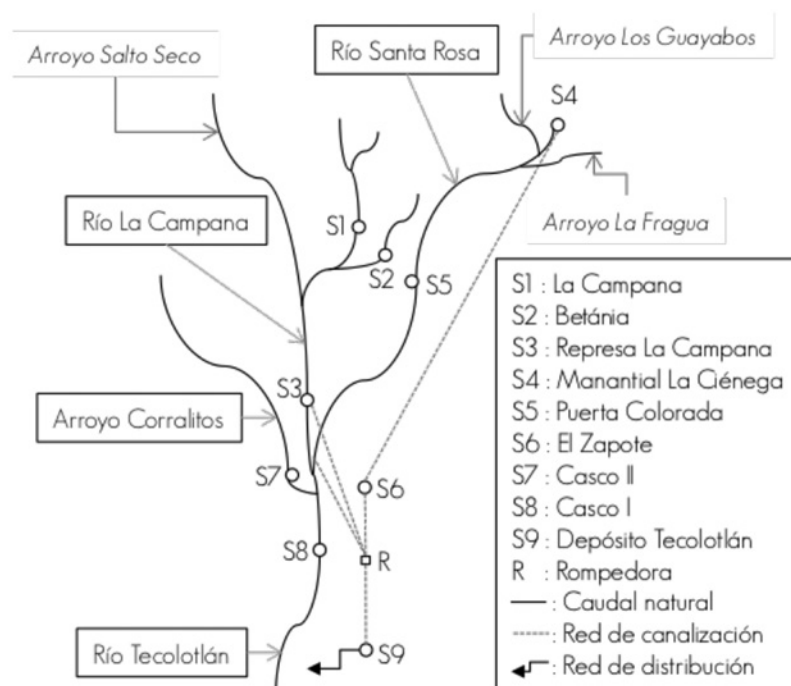


Figura 4. Red de caudales naturales, sitios de medición de gasto, redes de canalización y distribución del agua proveniente de las microcuencas de los ríos La Campana y Santa Rosa y arroyo Corralitos del área protegida Sierra de Quila, estado de Jalisco.

Figure 4. Natural flow network, expense measurement sites, pipeline networks and water distribution that comes from the microbasins of the *La Campana* and *Santa Rosa* rivers and *Corralitos* stream microbasins of the protected area of *Sierra de Quila*, *Jalisco* state.

media del flanco sur del Cerrito Verde. Cabe mencionar que el cauce del río de esta microcuenca ha sido modificado en un canal perpendicular a su cauce natural, con el fin de distribuir el agua a una zona de uso agrícola y pecuario; el canal abastece dos bordos y posterior a estos, el agua excedente se infiltra. El gasto promedio anual de este arroyo fue de 15.5 L s^{-1} y su gasto fue constante del mes de agosto de 2012 a abril de 2013 (Cuadro 5 y Figura 5); en mayo, temporada de estiaje, se registró un repunte en el caudal promedio de las microcuencas debido a que 2013 fue el cuarto año más lluvioso desde 1941, a pesar de que los dos años anteriores fueron de los más secos. Jalisco ocupó el quinto lugar de los estados más húmedos (CNA, 2013); en el centro-occidente del país, en enero se registraron lluvias intensas, mientras que en los siguientes meses ocurrieron precipitaciones intermitentes con algunas lluvias fuertes al final de mayo (Figura 5). Otra connotación es el volumen "excedente" por microcuenca calculado en relación con el gasto promedio total registrado en el sitio 8 (S8) - Casco I (caudal principal e intersección de las corrientes de las tres microcuencas), y la diferencia del gasto con respecto al subtotal mensual por microcuenca, lo anterior se atribuye al desvío de agua para el abastecimiento a la población, retención superficial, entre otros factores que intervienen en el ciclo hidrológico (Cuadro 5).

the total average expense registered in site 8 (S8) - Casco I (main flow and intersection of currents of the three microbasins), and the difference of expense with respect to the monthly subtotal by microbasin, which is attributed to the diversion of water for the supply to the population, superficial retention among other factors that are involved in the water cycle (Table 5).

Figure 6 shows the percent relation of the average monthly captures from sites 3 (*Represa La Campana*), S5 (*Puerta Colorada*) and S6 (*El Zapote*) which provide the water deposit to *Tecolotlán* town, with a storage capacity of 297 m^3 (297 000 L). Such deposit received an annual average of 26 L s^{-1} (17 %) of the total expense that produced *La Campana* and *Santa Rosa* rivers; during July and August (intense rain period), it only captured 9 % (35.2 L s^{-1}) of the total expense, a situation that even exceeded the its storage capacity and, consequently, loss of water by spill. During the drought time, the deposit demanded in May and June of 2012, 34 and 45 %; in April 2013, 35 % of the recorded expense (Figure 6).



Cuadro 5. Caudal natural promedio mensual y distribución relativa (%) por microcuenca.

Año	Mes	Caudal (L s ⁻¹)			Subtotal	Distribución (%)				Caudal (L s ⁻¹)
		MRC	MRSR	MAC		MRC	MRSR	MAC	Total	S8-Casco I
2012	Mayo	64.6	30.0	1.4	96.0	67.3	31.2	1.5	100	17.9
	Junio	34.7	57.7	8.8	101.2	34.3	57.0	8.7	100	104.2
	Julio	197.9	210.4	9.9	418.2	47.3	50.3	2.4	100	528.7
	Agosto	180.8	247.1	14.3	442.3	40.9	55.9	3.2	100	320.5
	Septiembre	121.7	171.1	13.6	306.4	39.7	55.8	4.4	100	155.9
	Octubre	94.0	115.4	16.4	225.8	41.6	51.1	7.3	100	49.9
	Noviembre	57.3	99.3	13.5	170.0	33.7	58.4	7.9	100	16.8
	Diciembre	57.6	93.2	15.4	166.2	34.7	56.1	9.3	100	9.2
2013	Enero	56.5	80.7	14.8	152.0	37.2	53.1	9.7	100	10.4
	Febrero	68.2	73.9	14.2	156.3	43.7	47.3	9.1	100	7.1
	Marzo	51.5	48.8	15.1	115.4	44.6	42.3	13.1	100	3.6
	Abril	34.7	23.8	15.9	74.4	46.6	32.0	21.4	100	0.0
	Mayo	38.0	31.9	32.5	102.4	37.1	31.2	31.7	100	0.0
Total		1057.6	1283.2	185.9	2526.7					1224.2

MRC= río La Campana; MRSR= río Santa Rosa; MAC= arroyo Corralitos.

Table 5. Average monthly natural flow and relative distribution (%) by microbasin.

Year	Month	Flow (L s ⁻¹)			Subtotal	Distribution (%)				Flow (L s ⁻¹)
		MRC	MRSR	MAC		MRC	MRSR	MAC	Total	S8-Casco I
2012	May	64.6	30.0	1.4	96.0	67.3	31.2	1.5	100	17.9
	June	34.7	57.7	8.8	101.2	34.3	57.0	8.7	100	104.2
	July	197.9	210.4	9.9	418.2	47.3	50.3	2.4	100	528.7
	August	180.8	247.1	14.3	442.3	40.9	55.9	3.2	100	320.5
	September	121.7	171.1	13.6	306.4	39.7	55.8	4.4	100	155.9
	October	94.0	115.4	16.4	225.8	41.6	51.1	7.3	100	49.9
	November	57.3	99.3	13.5	170.0	33.7	58.4	7.9	100	16.8
	December	57.6	93.2	15.4	166.2	34.7	56.1	9.3	100	9.2
2013	January	56.5	80.7	14.8	152.0	37.2	53.1	9.7	100	10.4
	February	68.2	73.9	14.2	156.3	43.7	47.3	9.1	100	7.1
	March	51.5	48.8	15.1	115.4	44.6	42.3	13.1	100	3.6
	April	34.7	23.8	15.9	74.4	46.6	32.0	21.4	100	0.0
	May	38.0	31.9	32.5	102.4	37.1	31.2	31.7	100	0.0
Total		1057.6	1283.2	185.9	2526.7					1224.2

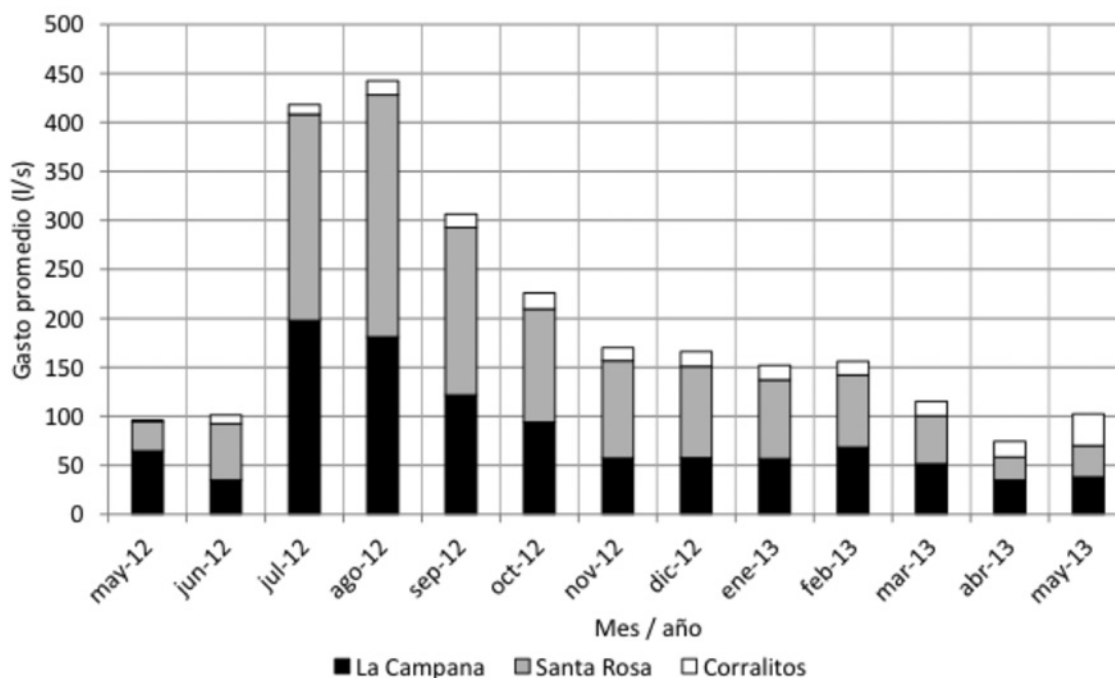


Figura 5. Gasto promedio de las microcuencas La Campana, Santa Rosa y Corralitos del área protegida Sierra de Quila y zona de influencia.

Figure 5. Average expense of *La Campana*, *Santa Rosa* and *Corralitos* microbasins of *Sierra de Quila* protected area and its zone of influence.

MRC = *La Campana* river; MRSR = *Santa Rosa* river; MAC = *Corralitos* stream;
Sup. = surface

La Figura 6 muestra la relación porcentual del gasto promedio mensual captado de los sitios S3 (Represa La Campana), S5 (Puerta Colorada) y S6 (El Zapote), mismas que suministran el depósito de agua del poblado de Tecolotlán, con capacidad de almacenamiento de 297 m³ (297 000 L). Este depósito recibió un promedio anual de 26 L s⁻¹ (17 %) del total del gasto que generaron los ríos La Campana y Santa Rosa; durante julio y agosto (período de lluvia intensa), solo se captó 9 % (35.2 L s⁻¹) del gasto total por mes, situación que incluso llegó a superar la capacidad de almacenamiento del depósito y, por consecuencia, hubo pérdida de agua por derrame. Durante el tiempo de estiaje, la demanda en mayo y junio de 2012 fue de 34 y 45 %; en abril de 2013, 35 % del gasto registrado (Figure 6).

Una de las fuentes naturales de agua de mayor reconocimiento que brota de la tierra en la Sierra de Quila es el manantial La Ciénega que emerge a los 2 100 msnm de manera perenne de un curso subterráneo que proviene de la parte alta del cerro El Huehuentón, a los 2 560 m; junto a dos afloramientos efímeros, los arroyos Los Guayabos y La Fragua, conforma al río Santa Rosa. El volumen promedio de agua que descargó de mayo de 2012 a mayo de 2013 fue de 57.4 L s⁻¹ (Figura 7), el cual puede ser categorizado como de tercera magnitud (entre 28 y 280 L s⁻¹) (Meinzer, 1923), en

One of the natural water sources of greatest acknowledgement that emerges from the ground in *Sierra de Quila* is *La Ciénega* spring that appears at 2 100 masl in a permanent way from an underground course that comes from the high part of *El Huehuentón* hill, at 2 560 masl; together with two ephemeral springs, *Los Guayabos* and *La Fragua*, it makes up *Santa Rosa* river. The average water volume that drained from May 2012 to May 2013 was 57.4 L s⁻¹ (Figure 7), which can be classified as of third magnitude (between 28 and 280 L s⁻¹) (Meinzer, 1923), in a range from one to eight; while the spring that supplies *Corralitos* brook recorded an annual average expense of 14.3 L s⁻¹, becoming thus classified as of fourth magnitude (between 6.3 and 28 L s⁻¹); in contrast, *La Campana* river and *Betania* spring showed a clear fluctuation that is influenced by precipitation, since they reach their highest maximum values during summer, a fact that suggests that they are related to the rain regime and minimal values during the drought season (Figure 7).



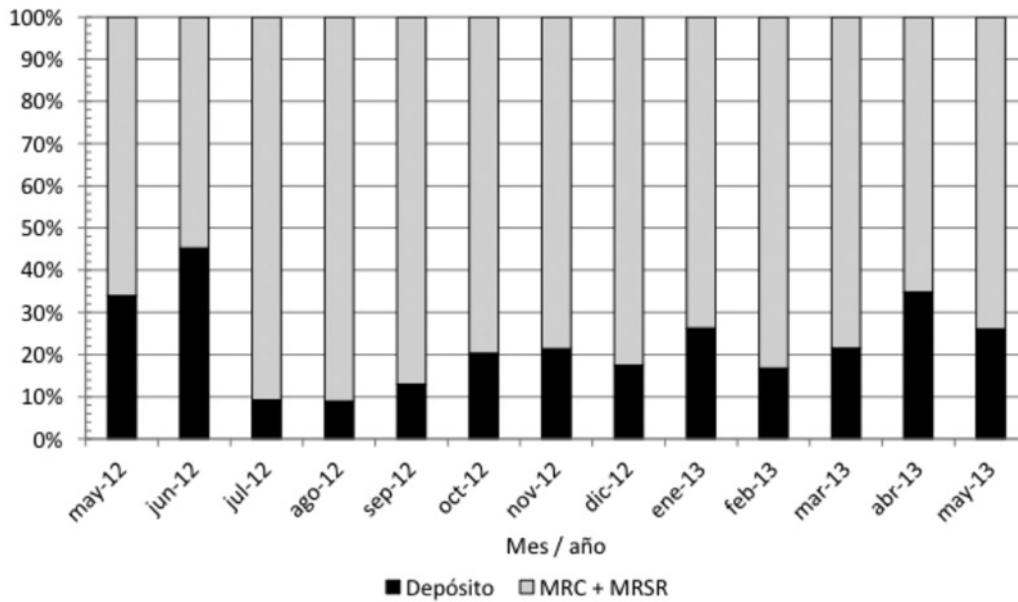


Figura 6. Relación porcentual del gasto de agua que percibe el depósito del poblado de Tecolotlán proveniente de los ríos La Campana (MRC) y Santa Rosa (MRSR) del área protegida Sierra de Quila, estado de Jalisco.

Figure 6. Percent relation of the water expense that Tecolotlan's deposit receives and that comes from *La Campana* (MRC) and *Santa Rosa* (MRSR) rivers of *Sierra de Quila* protected area, Jalisco state.

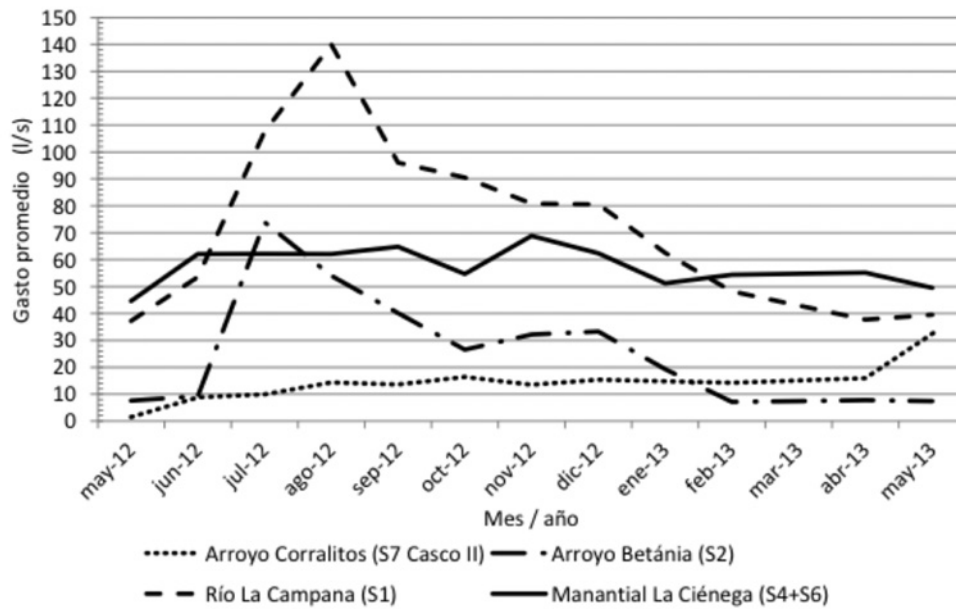


Figura 7. Gasto promedio anual (2012-2013) del caudal del río La Campana y el arroyo Betania en contraste con el aporte de los manantiales La Ciénega y arroyo Corralitos del área protegida Sierra de Quila, estado de Jalisco.

Figure 7. Annual average expense (2012-2013) of *La Campana* river and *Betania* spring in contrast to the income from *La Ciénega* springs and *Corralitos* brook from the *Sierra de Quila* protected area at Jalisco state

un intervalo de uno a ocho; mientras que el manantial que provee al arroyo Corralitos registró un gasto promedio anual de 14 L s^{-1} , y estaría clasificado como de cuarta magnitud (entre 6.3 y 28 L s^{-1}); en contraste, el del río La Campana y el arroyo Betania presentaron una marcada fluctuación que es influenciada por la precipitación, ya que alcanzan sus valores máximos durante el verano, lo que supone que están relacionados con el régimen de lluvia, y mínimos durante la temporada de secas (Figura 7).

CONCLUSIONES

El balance hídrico promedio anual tuvo un comportamiento similar en las dos microcuencas de la parte alta y en la meseta de la Sierra de Quila; por un lado, del total de agua de lluvia que captan, en la microcuenca del río La Campana se evapora 61.4% , se escurre 3.6% y se infiltra 35% ; mientras que en la del río Santa Rosa se presentan los siguientes valores respectivos: 61.3% , 5.2% y 33.5% ; por el contrario, en la parte baja, que corresponde a la zona del valle de Tecolotlán, la microcuenca del arroyo Corralitos registró 63.5% de evaporación, 14.7% de escurrimiento y solo 21.8% de infiltración.

El modelaje geográfico de la infiltración permitió no sólo definir las zonas potenciales de recarga, sino también aquellas de menor intervalo de infiltración de agua; para ambos casos, se sugiere evaluar los recursos *in situ* y realizar acciones de manejo.

Los manantiales que dan origen a los ríos de las microcuencas se localizan en zonas potencialmente propicias para alimentar áreas de recarga hídrica, por lo que es conveniente mejorar el vínculo hidrológico-forestal a fin de garantizar la sostenibilidad del recurso.

El flujo promedio anual registrado en el depósito de Tecolotlán fue de 26 L s^{-1} ; esto es, 17% del total que proviene de las microcuencas La Campana y Santa Rosa. Durante la época de estiaje, el caudal promedió 21 L s^{-1} , y en la época de lluvias, 33.5 L s^{-1} , cantidad de agua, esta última, que supera la capacidad de almacenamiento de los depósitos.

En general, la infraestructura de la red de canalización, captura, concentración y distribución del agua al poblado es deficiente e inadecuada, por lo que es inexcusable aplicarle mejoras.

Es necesario implementar una estrategia participativa entre la autoridad municipal, los responsables administrativos y los usuarios del área natural protegida así como con los habitantes del poblado de Tecolotlán para unir sinergias e impulsar procesos sociales, ambientales y de gestión para manejar y proteger correctamente el componente hidrológico de la región.



CONCLUSIONS

The annual average balance had a similar behavior in both microbasins of the upper part and of the meseta of Sierra de Quila; on the one side, the total rain water that they capture, in La Campana river microbasin, 61.4% evaporates, 3.6% runoff and 35% infiltrates; while, in that of Santa Rosa river the following respective values occur: 61.3% , 5.2% and 33.5% ; on the opposite, in the low part, which belongs to the Tecolotlán valley, the Corralitos stream microbasin recorded 63.5% of evaporation, 14.7% runoff and 21.8% infiltrates.

The geographic modeling of infiltration allowed not only to define the potential reload zones, but also those of lower water infiltration range; for both cases, it is suggested to assess the resources *in situ* and to carry out management actions.

The springs that give birth to the rivers of the microbasins are found in the potentially favorable zones to nourish the water reload areas, which makes it convenient to improve the forest-water link as to guarantee the sustainability of the resource.

The annual average flow recorded in the Tecolotlán deposit, was 26 L s^{-1} ; 17% of the total that comes from the La Campana and Santa Rosa microbasins. During the drought season, the average flow was 21 L s^{-1} , and in the rainy season, 33.5 L s^{-1} , amount which overflows the storage capacity of the deposits.

In general, the town pipeline network, capture, concentration and water distribution infrastructure is inefficient and inadequate, which makes it mandatory to carry on an improvement of the water services.

It is necessary to apply a participative strategy among the municipal authority, the administration actors and the users of the natural protected area, as well as with the inhabitants of Tecolotlán, in order to put together synergic actions and to foster social, environmental and paperwork to correctly manage and protect the hydrological component of the region.



AGRADECIMIENTOS

El proyecto fue financiado por la Universidad de Guadalajara con recursos P3E2012-136814 y P3E2013-218282 y por el Comité Regional de Protección, Promoción y Fomento de los Recursos Naturales de la Sierra de Quila, A. C (POA-2012). Los autores desean expresar su reconocimiento al Ing. Alejandro López Vázquez, Director del área natural protegida; al Ayuntamiento de Tecolotlán período 2012-2015, a la Mesa Directiva y Miembros del Ejido de Tecolotlán por las facilidades brindadas en la realización de este estudio. Al Sr. Ernesto Hernández Preciado, de la Unidad de Servicios Generales del ayuntamiento de Tecolotlán y a todo su grupo de trabajo, por cedernos su tiempo y colaboración durante los registros de agua en las cajas de captación y depósitos. A todos los brigadistas del Comité Regional de Sierra de Quila, por el apoyo otorgado durante las estancias en campo.

REFERENCIAS

- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2011. Normas oficiales mexicanas del sector agua. NOM-011-CNA-2000. <http://www.cna.gob.mx> (10 de enero de 2011).
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2013. Reporte de Clima en México: Reporte Anual 2013. 23 p. <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/analisis/reportes/Anual2013.pdf> (10 de marzo de 2014).
- Cruz B., G. 2003. La cuenca como unidad de planeación ambiental. Seminario sobre instrumentos económicos para cuencas ambientales. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Serie: Estudios. Núm. 4. pp. 7-11.
- Cruz F., A., R. Vázquez G., J. Ramírez H., E. H. Nava S., E. Troyo D., J. Rivera R. y J. E. Vega M. 2011. Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, BCS, México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo* 27(3): 251-263.
- Díaz P., G., I. Sánchez C., R. A. Guajardo P., F. Barbosa M., M. Gómez C. y J. M. Uribe E. 2012. Modelación espacial de la producción de agua y escurrimiento superficial del agua de lluvia en la zona sur del estado de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua. Número especial TyCA-RETAC*. 3:69-85.
- Duque E., G. 2003. Aguas subterráneas. In: *Manual de Geología para Ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. pp. 399-420.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2008. ArcGIS 9.3. Environmental Systems Research, Institute Inc. Redlands, CA. USA. s/p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2000. FAO Electronic Workshop. Rome, Italy. <http://www.fao.org/landandwater/watershed/> (25 marzo de 2014).
- Flores A., A. J. J. Reynoso D., L. Hernández L. y E. A. Suárez M. 2013. Monocultivos del área protegida Sierra de Quila, Jalisco, México. *Ibugana*. 4: 39-58. <http://ibugana.cucba.udg.mx> (20 de octubre de 2013).
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía - Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México. 146 p.
- González L. H., L. G. Arvizu C. y M. A. Domínguez C. 2013. Uso de herramientas informáticas para la caracterización geomorfológica de cuencas hidrográficas. In: *Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Morelia, Mich. México. pp. 3-14.
- Flemming, M. J. and J. H. Doan. 2009. HEC-Geo HMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension Version 4.2 US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. USA. s/p.
- Instituto Nacional de Bosques (INAB). 2005. Programa de investigación de hidrología forestal. Instituto Nacional de Bosques. Guatemala, Guatemala. 38 p.

ACKNOWLEDGEMENTS

This Project was sponsored by the *Universidad de Guadalajara* with the P3E2012-136814 and P3E2013-218282 resources and to the Regional Committee of Protection, Promotion and Foster of the Natural Resources of *Sierra de Quila*, A. C (POA-2012). To Ing. Alejandro López Vázquez, Director of the natural protected area; to Tecolotlán's city council for the 2012-2015 period; to the Board of Directors and Members of *Tecolotlán Ejido* for the facilities they provided to carry out this study. To Mr. Ernesto Hernández Preciado, of the General Services Unity of *Tecolotlán's* city council and to all his group of work for their time and help during the water records in the collection boxes and deposits. An to all the crew of *Sierra de Quila* Regional Committee for the support given to us during field work

End of the English version

- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2004. Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro. *Gaceta Ecológica*. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. México. 47 p. http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf (15 marzo de 2014).
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1999a. Carta edafológica F13D73 Atengo, F13D74 Cocula, F13D83 Tecolotlán y F13D884 Atemajac de Brizuela. Escala 1:50,000. México, D.F. México. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1999b. Carta topográfica F13D73 Atengo, F13D74 Cocula, F13D83 Tecolotlán y F13D884 Atemajac de Brizuela. Escala 1:50,000. México, D.F. México. s/p.
- Meinzer, O. E. 1923. The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles. U.S. Geol. Washington, DC. USA. Survey Water - Supply Paper 489. 321 p.
- Posner, J., C. Bussink, R. J. Hijmans, R. Delgado, H. Willet, P. Zorogastúa y J. de la Cruz. 2003. Priorizando áreas para la conservación de la microcuenca La Encañada. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (Condesan) Lima, Perú. Núm. 2. 29 p.
- Rivera B., J., B. H. Ruiz M., C. Patiño G., J. Velázquez A., G. Vargas R. y J. F. Santos S. 2013. Creación de una base de datos geográfica de agua superficial en la región hidrológica del río Santiago. In: *Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Morelia, Mich. México. pp. 33-41.
- Ruiz J., A., A. I. González J., C. Anguiano J., V. Vizcaíno I., R. J. Alcanzar J., L. H. Flores E. y R. J. Regalado. R. 2004. Clasificación climática del estado de Jalisco. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jal. México. Libro Técnico Núm. 1. 178 p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1993. Estudio de la flora y la fauna de la zona protectora forestal Sierra de Quila. Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF). México, D.F. México. 69 p.
- Suárez R., C. N., J. J. A. Fuentes J. y P. Zárate S. 2013. Implementación del ordenamiento territorial comunitario; una estrategia participativa para el manejo de los recursos hídricos en el ejido de Tumbisca, Michoacán. In: *Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Morelia, Mich. México. pp. 107-116.
- Strahler, A. N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Am. Geophys. Union Trans.* 38: 913-920.
- Treviño G., E., C. Muñoz, C. Cavazos C. y L. Barajas, L. 2002. Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*. 4: 525-530.