

PRECIPITACIÓN Y RECARGA EN LA CUENCA DE LA PAZ, BCS, MÉXICO

Rainfall and recharge in the basin of La Paz, BCS, Mexico

A Cruz-Falcón ✉, R Vázquez-González, J Ramírez-Hernández, EH Nava-Sánchez, E Troyo-Diéguez, J Rivera-Rosas, JE Vega-Mayagoitia

(ACF) (ETD) (JRR) (JEVM) Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Mar Bermejo No. 195, Col. Playa Palo de Santa Rita. La Paz BCS, 23090, México. Tel. (612) 123 8484 afalcon04@cibnor.mx
(RVG) Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada BC
(JRH) Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Mexicali BC
(EHNS) Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN), La Paz BCS

Artículo recibido: 18 de marzo de 2009, **aceptado:** 20 de diciembre de 2011

RESUMEN. Durante los últimos años, el acuífero de La Paz, BCS se ha visto seriamente afectado por la sobreexplotación debida a un mayor abastecimiento requerido por el crecimiento de la población, lo que ha provocado su contaminación por intrusión de agua de mar, de lo que se deduce que el manejo del recurso es inadecuado ya que se ha extraído más agua que la que proporciona la recarga natural por lluvias. Con el objetivo de estimar los volúmenes que manejan algunas de las componentes principales del sistema hidrológico de la cuenca de La Paz, se utilizó la ecuación general de balance hidrológico aplicada en un sistema de información geográfica (SIG) con lo que se generaron modelos digitales de precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimiento y recarga, a partir de datos climatológicos de 25 años (1980 a 2004). Se estimó una precipitación de $410 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, evapotranspiración de $330 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, escurrimiento superficial de $15 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$, y una recarga potencial por lluvias de $65 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$. La recarga por lluvias ocurre principalmente en las elevaciones montañosas ubicadas al este y sureste de la cuenca (sierra Las Cruces y El Novillo) y es equivalente al 15.9% de la precipitación. La subcuenca de El Novillo es la que cubre una mayor superficie y capta más del 50% del total de las lluvias.

Palabras clave: Cuenca de La Paz, precipitación, balance hidrológico, recarga por lluvias, sistema de información geográfica, datos climatológicos.

ABSTRACT. Over the last years, the aquifer of La Paz, BCS has been seriously affected by over-exploitation generated by population growth, that has resulted in its pollution by salt water intrusion. It may thus be seen that the management of the resource has been inadequate, as more water than that provided by natural recharges from rainfall has been extracted. In order to estimate the volumes of some of the main components of the hydrologic system of the La Paz basin, the hydrologic equilibrium general equation applied to a geographical information system (GIS) was used, and digital models were produced for rainfall, temperature, evapotranspiration, runoff and recharge, with climate data for 25 years (1980 to 2004). Estimated data were a rainfall of $410 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$, $330 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$ of evapotranspiration, $15 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$ of surface runoff, and a potential rainfall recharge of $65 \text{ Mm}^3 \text{ year}^{-1}$. Rainfall recharge mainly takes place in the mountain heights located to the east and southeast of the basin (Las Cruces and El Novillo mountain ranges) and is equivalent to 15.9% of the rainfall. The sub-basin of El Novillo covers the larger surface and receives more than 50% of the total rainfall.

Key words: La Paz basin, rainfall, hydrologic balance, rainfall recharge, geographical information system, climate data.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de La Paz se localiza en el extremo sur de la península de Baja California. Durante años la fuente de abastecimiento requerido de agua dulce para la población y agricultura se ha obtenido de la explotación de agua subterránea del acuífero

del valle de La Paz, pero debido al incremento en la demanda de agua por el aumento de la población, desde hace algunos años el acuífero se encuentra en condición de sobreexplotación (CNA 1997).

La disponibilidad del recurso agua se puede estimar a partir de un balance hidrológico mediante la determinación de la recarga y la extracción. Para

el manejo eficiente de los recursos hídricos subterráneos la cuantificación de la recarga natural es un requisito fundamental, sobre todo en regiones de alta demanda de agua subterránea, en zonas áridas que carecen de ríos y lagos, y donde este recurso es la llave para el desarrollo económico. La recarga de agua subterránea es un proceso mediante el cual el agua superficial o de lluvia se percola a través del suelo hasta alcanzar el nivel de agua subterránea (Davis & Wiest 1971). En la literatura se describen varios métodos para determinar la recarga, sin embargo, no están claramente definidos ni ordenados (Sophocleous 1991; Kommadath 2000; Bridget *et al.* 2002). El elegir un método apropiado es a menudo difícil, y para decidir cual método utilizar se requiere considerar la escala espacial y temporal del lugar, así como la información geohidrológica e hidrometeorológica existente (Bridget *et al.* 2002), por lo que se deduce que la cuantificación de la recarga de acuíferos es uno de los factores más difíciles de medir en la evaluación de los recursos subterráneos (Sophocleous 1991).

Los métodos para estimar recarga se pueden agrupar en dos clases generales, como recarga potencial y recarga real (Bridget *et al.* 2002). Las estimaciones de recarga potencial son técnicas basadas en datos de aguas superficiales y de la zona no saturada (Bridget *et al.* 2002), por lo que se pueden considerar menos precisas que las reales, ya que el cálculo se realiza a partir de información superficial como precipitación, temperatura, escurrimientos y evapotranspiración; sin embargo, debido a la escasez y calidad de la información resulta un medio adecuado para determinar este parámetro. El método de balance hidrológico toma en cuenta la ecuación de balance y sus variantes a través del uso de fórmulas que se basan en relaciones establecidas empíricamente por la comparación de escurrimientos y precipitaciones en numerosas cuencas (Sánchez 2005).

La recarga de un acuífero proviene de diferentes fuentes, principalmente por precipitación como recarga vertical y en forma horizontal debido al flujo horizontal subterráneo (Peña & Arcos 2004). La recarga vertical puede ser natural o inducida, la primera es generalmente debida a una parte que logra

infiltrarse de la precipitación total que se presenta en el área donde se localiza el acuífero, y la inducida es debida a acciones humanas directas e indirectas como el riego agrícola, sistemas de distribución de agua potable y drenaje, presas, diques, bordos, etc. (Peña & Arcos 2004; Cruz-Falcón 2007). En este trabajo, se considera solamente la recarga potencial debida a la infiltración de agua producto de las lluvias.

Un sistema de cualquier cuenca hidrológica puede ser descrito mediante un balance en el que se consideran entradas y salidas. Una cuenca sedimentaria no necesariamente forma un acuífero, pero es importante conocer sus características y componentes hidrológicos ya que tendrán una influencia directa en el comportamiento del mismo.

Considerando las componentes principales de entrada y salida, el balance hidrológico de agua subterránea se representa mediante la ecuación para acuíferos no confinados (Kommadath 2000, modificado por Cruz-Falcón 2007), con lo que se calcula un cambio de almacenamiento Δa .

$$\Delta a = R_v + R_c + R_r + R_a + R_h - (E_t + E_s + D_s + E_p)$$

donde:

Entradas:

R_v = recarga vertical por lluvias (infiltración).

R_c = recarga proveniente de algún canal o río.

R_r = recarga por riego.

R_a = recarga artificial.

R_h = recarga horizontal proveniente de alguna otra cuenca o acuífero.

Salidas:

E_t = evapotranspiración.

E_s = escurrimiento superficial.

D_s = descarga subterránea al mar, lago, río, manantial, u otro acuífero.

E_p = explotación de pozos.

Algunas de las componentes de esta ecuación se calculan utilizando información hidrológica y meteorológica, por lo que es necesario contar con datos de suficientes estaciones climatológicas de la cuenca correspondiente (Kommadath 2000; Cruz-Falcón 2007).

La mayor participación de investigación en es-

tudios geohidrológicos en esta región la ha realizado en forma directa o indirecta el gobierno federal a través de instancias tales como la antigua Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) y la Comisión Nacional del Agua (CNA). La SARH-CNA (1991) realizaron un estudio de disponibilidad de los acuíferos del estado de Baja California Sur a partir de un balance hidrometeorológico, encuentran que la mayoría de ellos están sobreexplotados y estiman una recarga de $59 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ (millones de m^3 al año) para las cuencas de La Paz-Los Planes. La CNA (1997) realizó trabajos geohidrológicos diversos y una recopilación de otros estudios del acuífero de La Paz-El Carrizal. La CNA (1999) realizó un estudio de disponibilidad de agua del acuífero de La Paz por el método de balance de aguas subterráneas, sus resultados indican que no existe volumen disponible para nuevas concesiones. CIGSA (2001) llevó a cabo una recopilación y reinterpretación de información geohidrológica y geofísica, estimaron la recarga natural y sus resultados evidencian la sobreexplotación del acuífero. El IPN- CICIMAR/CIBNOR/UABCS (2002) estimaron la recarga promedio anual del acuífero de La Paz, los resultados arrojaron un balance negativo, situación que pone en un futuro crítico la conservación del acuífero. Drago & Maddock (2004) realizaron un modelo hidrológico para estimar la necesidad de agua en la ciudad de La Paz para las próximas décadas tomando en cuenta el crecimiento poblacional y estimaron la recarga natural de la zona acuífera.

Este estudio tiene como objetivo principal estimar la recarga por lluvias en la cuenca de La Paz en virtud de que se desconoce el volumen de agua que se infiltra anualmente al subsuelo, y del cual una parte pasa a formar parte del acuífero que se encuentra en continua explotación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca de La Paz se localiza en la parte sur de la península de Baja California donde se asienta la ciudad de La Paz (Figura 1). El clima en esta zona es predominantemente seco con una temperatura media de 20 a 26 °C, alcanzando tem-

peraturas máximas en los meses de julio, agosto y septiembre de hasta los 40-45 °C. La precipitación anual promedio en la cuenca es de 265 mm (CNA 2005) que ocurre principalmente durante el verano, con los más altos valores en agosto y septiembre. Al final del verano se presentan tormentas tropicales y ciclones que recargan los acuíferos de la región por las precipitaciones que traen asociadas. Existen cuatro presas captadoras de agua en la región, siendo la presa de La Buena Mujer, que se localiza al este de la ciudad de La Paz, la más importante, tanto para el control de avenidas como para recargar el acuífero.

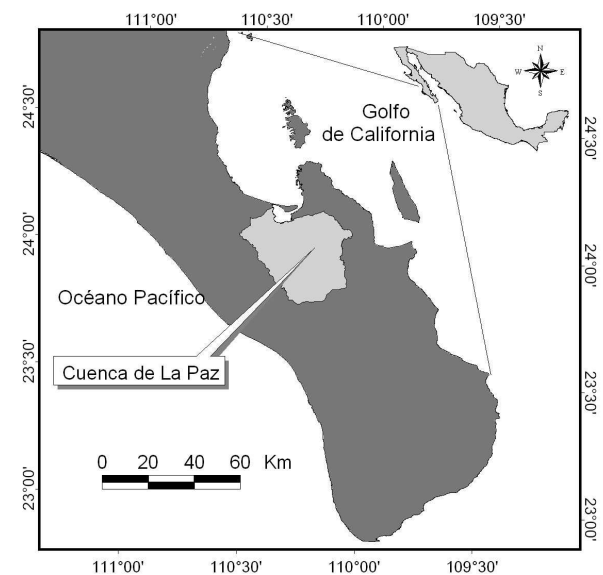


Figura 1. Localización del área de estudio.

Figure 1. Location of the study area.

Marco Geológico

Estructuralmente el valle de La Paz está formado por un graben o fosa tectónica con orientación norte-sur, limitado al este por la falla La Paz, ubicada en las faldas de la sierra Las Cruces, y al oeste por la falla El Carrizal (Álvarez *et al.* 1997), Figura 2.

De manera general, la geología del valle de La Paz-El Carrizal se caracteriza por una secuencia de sedimentos marinos y abanicos aluviales recientes, conformados por conglomerados y sedimentos poco consolidados y no consolidados de arenas, limos y

arcillas.

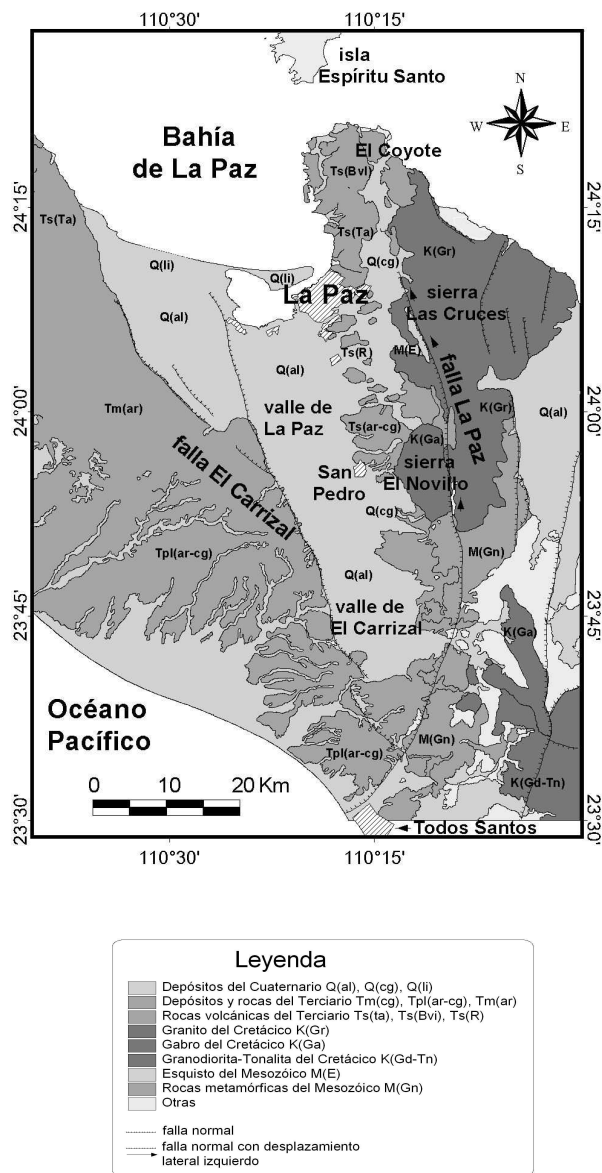


Figura 2. Mapa geológico-estructural del valle de La Paz - El Carrizal. Modificado de las Cartas Geológicas F12-3-5-6 y G12-10-11 (INEGI 1983) y de Álvarez et al. (1997).

Figure 2. Geologic-structural map of the La Paz - El Carrizal valley. Modified from Geological Charts F12-3-5-6 and G12-10-11 (INEGI 1983) and from Álvarez et al. (1997).

En el noroeste del valle afloran rocas con edades que van del Terciario Medio al Reciente y constituyen la formación San Gregorio (Oligoceno Superior - Mioceno Inferior) que contiene una alternancia de areniscas tobáceas, lutitas silicificadas,

fangolitas, areniscas conglomeráticas y capas de fosforita intercaladas; la formación San Isidro (inicios del Mioceno) constituida por areniscas glauconíticas, conglomerados, lutitas y algunas capas de tobas riolíticas de color rosado; y la formación Comondú (Mioceno Superior) formada por areniscas y conglomerados volcanoclásticos, tobas riolíticas, lahares andesíticos y flujos de lava. Hacia el noreste aflora una serie de rocas del Cretácico al Reciente que forman las sierras Las Cruces y El Novillo (Figura 2), la primera constituida por rocas ígneas intrusivas principalmente granito y tonalita, y la segunda constituida por gabro.

En los alrededores de la ciudad de La Paz se presenta una secuencia de rocas volcánicas y volcanosedimentarias, que se considera como la unidad más joven de la Formación Comondú (Hausback 1984; en Álvarez et al. 1997), y consiste de tobas, brechas y aglomerados volcánicos, así como lavas riodacíticas.

Cuenca de La Paz y subcuencas

Desde el punto de vista físico, cuenca hidrológica se define como una superficie en forma de "depresión" que capta el agua de lluvia. Una parte del agua que cae al suelo se evapotranspira, otra se infiltra al subsuelo, y la restante, una vez saturado el subsuelo, drena hacia un mismo lugar en las partes bajas, que pueden ser un lago, río, o el mar (INE 2001, modificado por Cruz-Falcón 2007). La cuenca de La Paz la definió oficialmente la CNA en el Diario Oficial de la Federación de febrero de 2004, pero su demarcación (CNA 1999) no se asemeja a los límites que ejerce el parteaguas de la cuenca, por lo que fue necesario delimitarla. Para esto se utilizó la cartografía de hidrología superficial y curvas de nivel escala 1:50,000 (INEGI 2003) referenciadas al Datum WGS84, a partir de lo cual se generó el modelo de elevación del terreno (MET). El proceso de demarcación del polígono de la cuenca se realizó con el programa ArcView 3.2 (ESRI 1999) en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del CIBNOR. Se posicionó la capa de escurrimientos sobre el MET, y se digitalizó paulatinamente la línea que constituye aproximadamente el parteaguas. La Figura 3 muestra la delimitación de la cuenca

de La Paz, la cual cubre una superficie aproximada de 1,275 km², y se ubica entre los 23° 47' 24" a 24° 10' 12" latitud norte y 110° 04' 48" a 110° 35' 12" longitud oeste. Mediante el mismo procedimiento anterior se delimitaron también las principales subcuencas, que son: El Cajoncito, La Huerta, La Palma, El Novillo y La Ardilla (Figura 3).

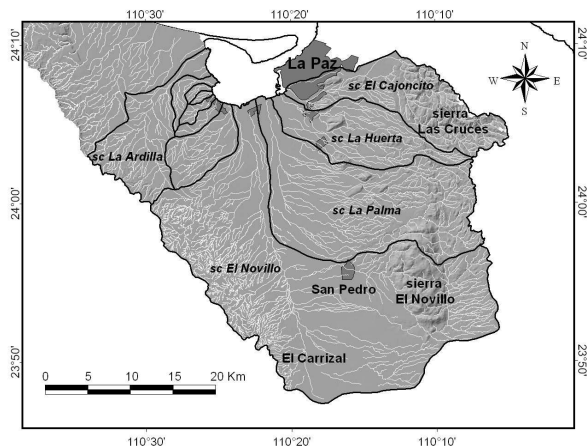


Figura 3. Cuenca hidrológica de La Paz (superficie de 1 275 km²). Se muestran los escurrimientos superficiales (líneas blancas) y las cinco subcuencas (sc) principales.

Figure 3. Hydrological basin of La Paz (surface of 1 275 km²). It is shown the runoff (white lines) and the five main sub-basins (sc).

Metodología

Para estimar la recarga vertical por lluvias en la cuenca de La Paz se utilizó un sistema de información geográfica (SIG) en el que se incluyó la ecuación general de balance hidrológico, con base en los criterios de Peña & Arcos (2004) y tomando en cuenta algunos parámetros calculados por Fikos *et al.* (2005). El proceso consistió en generar modelos digitales de diferentes características físicas del medio las cuales tienen contribución con la recarga. Como se trata de una estimación potencial de la recarga se utilizaron datos de temperatura y precipitación de estaciones climatológicas ubicadas dentro y en la zona adyacente de la cuenca con los que se obtuvieron modelos de precipitación y temperatura. Con la fórmula de Turc modificada por Cruz-Falcón (2007) se generó el modelo de evapotranspiración; así mismo, con información del uso de suelo y vegetación, edafología y precipitación, de acuerdo

a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (DOF 2002), con algunas modificaciones del parámetro K (Cruz-Falcón 2007) se obtuvo el modelo de coeficiente de escurrimiento. Este modelo se integró con el modelo de precipitación para generar el modelo de escurrimiento. A partir de los modelos de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento previamente generados se obtuvo el modelo de infiltración.

Consideraciones

Algunas consideraciones fueron hechas con las componentes principales de entrada y salida (descritas brevemente en la Introducción), como: la captación de agua en la cuenca ocurre por precipitación directa, por lo que no se tomó en cuenta la recarga horizontal (Rh), tampoco se consideró la recarga por riego (Rr) al no existir información, y la recarga artificial (Ra) de la presa de la Buena Mujer (única presa en servicio dentro de la cuenca de La Paz) no se tienen datos sobre su descarga. La ausencia de estas componentes en la estimación de la recarga afecta muy ligeramente el resultado, en virtud de que no existe recarga horizontal (Rh) de otra cuenca o acuífero (CNA, 1997;1999); al parecer las láminas de riego aplicadas en la zona agrícola de la cuenca que proporcionarían una recarga por riego (Rr) no alcanzan a infiltrarse lo suficiente para que esta agua pase a formar parte del agua subterránea o acuífero; y la recarga artificial (Ra) que pudiera proporcionar la presa de la Buena Mujer no existe ya que no tiene descarga al acuífero y se encuentra notablemente azolvada.

Debido a la sobreexplotación del acuífero se supone que no existen descargas subterráneas (Ds) hacia el mar a causa de que el flujo se ha invertido (CNA 1997; 1999), por lo que las salidas del sistema ocurren principalmente por evapotranspiración (Et), escurrimiento superficial (Es) y explotación de pozos (Ep).

Para el caso de las entradas se consideró únicamente la recarga vertical por lluvias (Rv), y como salidas se tomaron en cuenta la evapotranspiración (Et) y el escurrimiento superficial (Es).

Por consiguiente para calcular la infiltración o recarga se utilizó la ecuación de balance en su

forma reducida (Castany 1971):

$$P = E_s + E_t + I$$

donde:

P = precipitación

E_s = escurrimiento superficial

E_t = evapotranspiración

I = infiltración o recarga

Por tanto:

$$I = P - E_t - E_s$$

Los pasos que se siguieron para la aplicación del SIG se ejemplifican en el diagrama de flujo de la Figura 4. Como explicación sencilla del diagrama, el proceso [1] indica la entrada de datos de precipitación total anual (PTA) y temperatura media anual (TMA), los cuales provienen de las estaciones climatológicas que se muestran en la Figura 5. Los datos se interpolan para obtener bandas de distribución que se rasterizaron para generar los modelos de precipitación y temperatura correspondientes. El proceso [2] utiliza los valores de los modelos de precipitación y temperatura que se incluyeron en la fórmula empírica de Turc (modificada por Cruz-Falcón 2007) para generar el modelo de evapotranspiración (E_t). El proceso [3] presenta la utilización del modelo de precipitación junto al parámetro K (modificado por Cruz-Falcón 2007) que depende del tipo y uso de suelo, el cual se incluye en la fórmula para la estimación del coeficiente de escurrimiento (NOM-011-CNA-2000, DOF 2002), con que se generó un modelo de coeficiente de escurrimiento (C_e). Con el producto del modelo de escurrimiento (C_e) por el modelo de precipitación (P) se obtuvo el modelo de escurrimiento (E_s). El proceso [4] indica que con la diferencia entre los modelos de precipitación (P), de evapotranspiración (E_t) y escurrimiento, se obtiene el modelo de infiltración (I).

En la obtención de los modelos (más adelante) se explica con mayor detalle los procesos realizados. La resolución espacial de todos los modelos generados fue de 100 m.

Información requerida

Para operar el SIG se utilizaron datos de precipitación y temperatura que cubren un periodo de

25 años (1980 a 2004) de 12 estaciones climatológicas ubicadas dentro y próximas a la cuenca de La Paz (Figura 5). Los datos fueron proporcionados por la oficina estatal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las estaciones utilizadas fueron: El Cajoncito, Lagunillas, Los Divisaderos, San Pedro, La Paz, El Carrizal, Los Robles, Alfredo Bonfil, El Quemado, La Higuera, El Triunfo y El Rosario (Figura 5).

Modelo de precipitación

De los datos originales de precipitación se obtuvo la precipitación total anual (PTA) para cada estación mediante la suma de las precipitaciones mensuales. Luego se promediaron las PTA de los 25 años (1980-2004) para cada estación. Los valores promedio de PTA por estación se interpolan para obtener las isoyetas utilizando el método spline del programa ArcView 3.2. A partir de los contornos se generó una capa TIN (Triangular Irregular Network) que resulta de la interpolación triangular entre los nodos de los contornos. Posteriormente esta capa se rasterizó con una resolución espacial de 100 m y se generó el modelo de precipitación de la cuenca de La Paz (Figura 5).

Modelo de temperatura

Los valores mensuales de temperatura se promediaron para obtener la temperatura anual de cada año para cada estación, luego se promediaron las temperaturas de 25 años (1980-2004) de cada estación para obtener las temperaturas medias anuales (TMA). Se interpolan para generar el modelo de temperatura (Figura 6) siguiendo los mismos pasos que para obtener el modelo de precipitación.

Modelo de evapotranspiración

Este modelo se obtuvo utilizando la fórmula empírica de Turc (1961, en Custodio & Llamas 2001) la cual fue modificada en el factor constante para corresponder con las características de esta región (Cruz-Falcón 2007), al considerarse a partir del estudio de Fikos *et al.* (2005) una evapotranspiración aproximada de 80 %.

La fórmula de Turc (1961, en Custodio & Llamas 2001) incluye los parámetros de precipita-

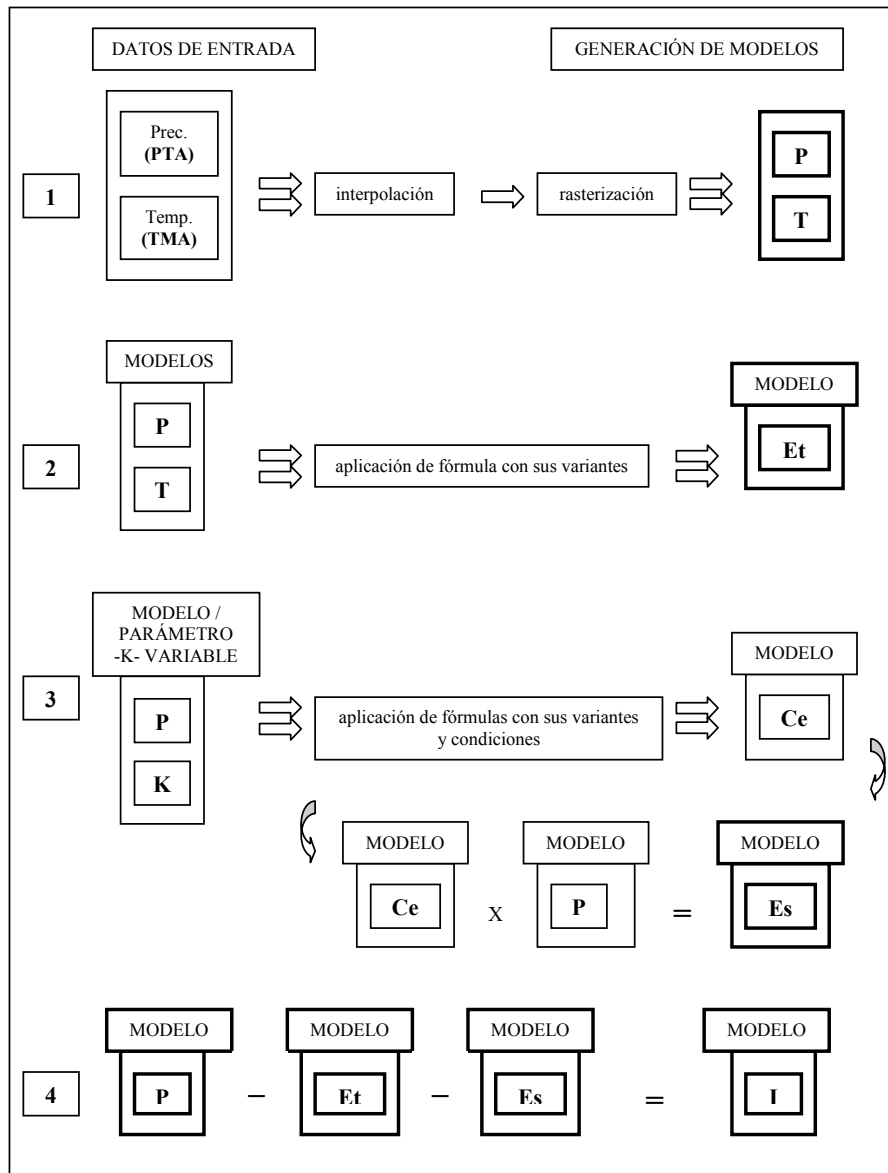


Figura 4. Diagrama que muestra los pasos (4) en la operación del SIG para generar los modelos digitales.
Figure 4. Diagram that shows the steps (4) in the operation of the GIS to generate the digital models.

ción (P) y temperatura (T), por lo que estos valores fueron tomados de los modelos de precipitación y temperatura previamente generados (Figuras 5 y 6).

$$Et = P / [1.5 + (P / L)^2]^{0.5} \quad (\text{fórmula de Turc, modificada por Cruz-Falcón 2007})$$

donde:

P = precipitación en mm.

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^2 \quad (\text{condición válida para } P > 0.31 L; \text{ si } P < 0.31 L, \text{ entonces } Et = P)$$

T = temperatura en °C.

Al operar estas fórmulas con el SIG, se obtuvo el modelo de evapotranspiración (Figura 7).

Modelo de escurrimiento

Para construir este modelo fue necesario obtener primero un modelo de coeficiente de escurri-

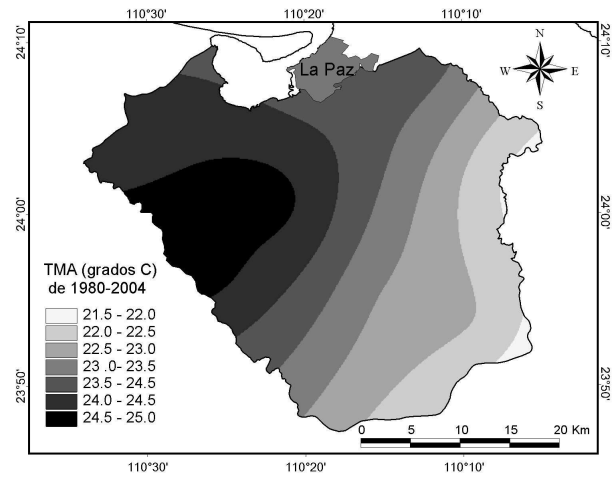
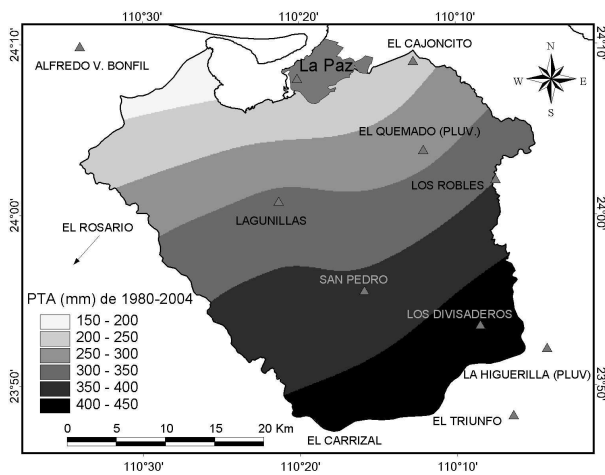


Figura 5. Modelo de precipitación total anual (mm) de la cuenca de La Paz. Se muestra la ubicación de las estaciones climatológicas (triángulos). Las estaciones de El Carrizal y El Rosario quedan fuera del recuadro.

Figure 5. Annual total rainfall model (mm) of the La Paz basin. The location of the climatologic stations (triangles) is shown. The stations of El Carrizal and El Rosario lie outside the frame.

Figura 6. Modelo de temperatura media anual (° C) de la cuenca de La Paz.

Figure 6. Annual mean temperature model (° C) of the La Paz basin.

Tabla 1. Valores del parámetro K (modificado por Cruz-Falcón 2007), para diferente tipo y uso de suelo. NOM-011-CNA-2000.

Table 1. Values of the K parameter (modified by Cruz-Falcón 2007), for different soil types and uses. NOM-011-CNA-2000.

Uso y Tipo de Suelo	Muy permeable	Medianamente permeable	Poco permeable
Área agrícola	0.24	0.27	0.30
Pastizal	0.20	0.24	0.30
Mezquital	0.12	0.22	0.26
Edificaciones	0.28	0.29	0.32
Veg. halófito	0.28	0.29	0.32
Matorral	0.16	0.23	0.28
Selva baja	0.14	0.22	0.27

miento (Ce), el cual se generó a partir del cálculo de coeficientes de escurrimiento en el que se utiliza un parámetro K que depende del tipo y uso de suelo (Tabla 1), así como de la precipitación. Para este proceso se utilizó la información de los mapas de edafología y uso de suelo y vegetación de INEGI (2000) en formato raster.

La vegetación de esta región como matorral y mezquital que no estaba contenida en la Tabla 1, se le asignó un valor K de acuerdo a su similitud con otra vegetación. Para el tipo de suelo se consideró principalmente la textura y fase física tomando en cuenta que la cuenca está constituida en su mayor

parte y en este orden, por regosol, litosol y xerosol.

Para obtener el Ce se utilizó la expresión empírica de la NOM-011-CNA-2000 (DOF 2002), con las modificaciones realizadas por Cruz-Falcón (2007) al parámetro K:

$$Ce = K [P - 250 / 2000 + [K - 0.15 / 1.5]] \text{ (para } K > 0.15)$$

$$Ce = K [P - 250 / 2000] \text{ (para } K \leq 0.15)$$

donde:

Ce = coeficiente de escurrimiento anual (adimensional).

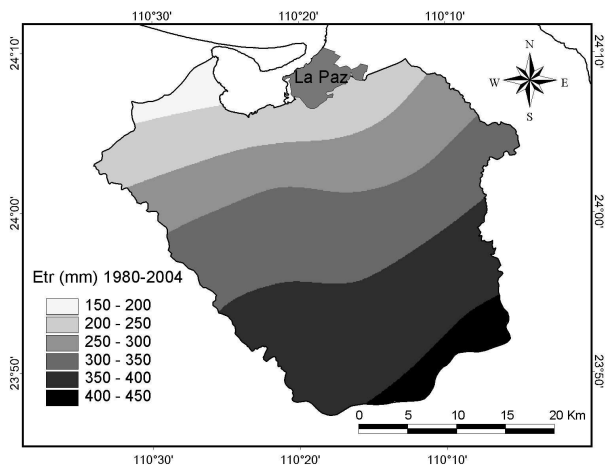


Figura 7. Modelo de evapotranspiración (mm) de la cuenca de La Paz.

Figure 7. Evapotranspiration model (mm) of the La Paz basin.

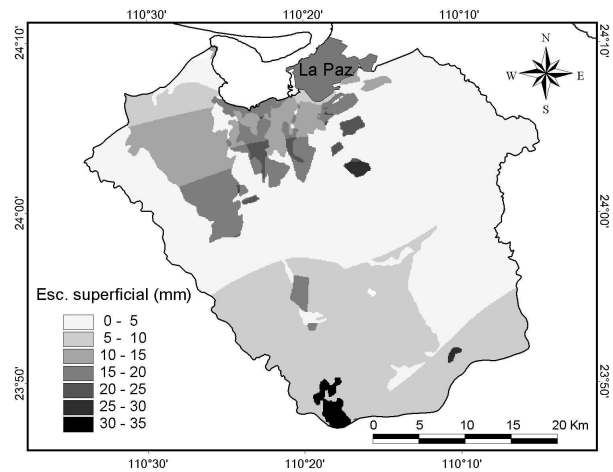


Figura 8. Modelo de escurrimiento (mm) de la cuenca de La Paz.

Figure 8. Runoff model (mm) of the La Paz basin.

Tabla 2. Superficie y captación de agua de lluvia de las principales subcuencas de la cuenca de La Paz (Figura 3).

Table 2. Surface and rainwater collection of the main sub-basins of the La Paz basin (Figure 3).

Subcuenca	Superficie (km ²)	Captación de precipitación (Mm ³ /año)	% del total
El Cajoncito	133.74	35.41	8.64
La Huerta	105.03	27.76	6.77
La Palma	277.38	90.55	22.09
El Novillo	589.24	218.18	53.21
La Ardilla	91.92	20.31	4.95
Otras pequeñas	77.70	17.79	4.34
Σ	1275	410	100

K = parámetro que depende del uso y tipo de suelo.
P = precipitación.

Con el producto del modelo de precipitación (Figura 5), con el modelo de coeficiente de escurrimiento, se generó el modelo de escurrimiento (Figura 8).

Modelo de infiltración

Al modelo de precipitación (Figura 5) se le restaron los modelos de evapotranspiración (Figura 7) y escurrimiento (Figura 8) para generar el modelo de infiltración (Figura 9), de acuerdo con la expresión:

$$I = P - Et - Es \text{ (Castany 1971).}$$

RESULTADOS

A partir de la construcción del modelo de precipitación de la cuenca de La Paz (Figura 5) se estimó, por medio de la suma de los píxeles del mismo, una captación promedio anual de agua de lluvia de 410 Mm³. En el modelo se observa un rango de valores que va de 150 a 400 mm año⁻¹, donde la mayor precipitación ocurre en la región elevada hacia el SSE, la cual disminuye paulatinamente en sentido opuesto hacia las zonas bajas localizadas al NNW.

La Tabla 2 refiere las principales subcuencas de la cuenca de La Paz (Figura 3), su superficie aproximada y captación de agua de lluvia. Los valores de captación de la precipitación para cada subcuenca se extrajeron del modelo de precipitación (Fi-

gura 5), mediante la sumatoria de los valores de los píxeles correspondientes a cada subcuenca. La subcuenca de El Novillo es la más trascendental ya que es la que cubre una mayor superficie y capta más del 50 % del total de lluvia que recibe la cuenca de La Paz (Tabla 2), además forma parte de las principales zonas de recarga localizadas hacia el SE de la cuenca en el modelo de infiltración (Figura 9). Las otras subcuencas que son en orden de importancia, La Palma, El Cajoncito y La Huerta, también juegan un papel esencial en la captación de agua así como en la recarga del acuífero, principalmente en el extremo este de la cuenca.

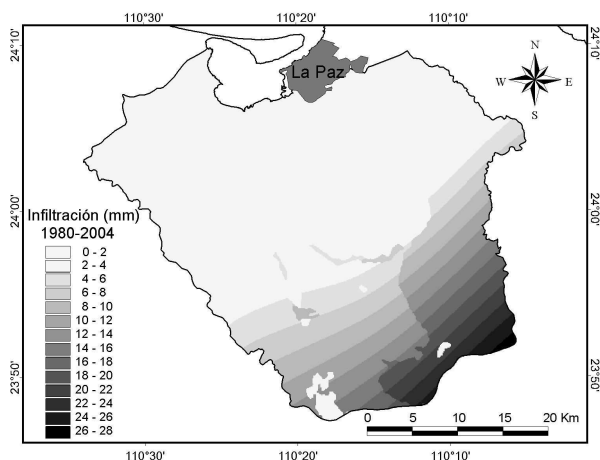


Figura 9. Modelo de infiltración (mm) de la cuenca de La Paz.
Figure 9. Filtration model (mm) of the La Paz basin.

En el modelo de temperatura media anual (TMA) obtenido (Figura 6) se observa que su distribución en la cuenca va de 21.5 a 25 °C, donde las máximas temperaturas medias anuales se presentan en la región llana al WNW, y las mínimas en la región más elevada al ESE.

El modelo de evapotranspiración (Figura 7) presenta una mayor pérdida de agua por este efecto en las regiones elevadas y con vegetación más alta, principalmente al centro, sur y sureste de la cuenca, y disminuye en sentido opuesto hacia las zonas bajas y planas. Cabe aclarar que este modelo se comporta en forma diferente a lo que se esperaría de acuerdo al modelo de temperatura, es decir, a mayor temperatura se esperaría mayor evapotranspiración y a

menor temperatura menor evapotranspiración, sin embargo, debido a las condiciones de presencia de vegetación como selva baja caducifolia en las zonas relativamente más elevadas y frías, así como la ocurrencia de una mayor precipitación en estas áreas de la cuenca (Figura 5) es factible que origine la distribución de la evapotranspiración como lo muestra el modelo (Figura 7). Por otro lado, el modelo de temperatura media anual en la cuenca de La Paz (Figura 6) presenta solo una diferencia de 3 °C entre los límites de la cuenca.

Del modelo de escurrimiento (Figura 8) se interpreta que existe un mayor escurrimiento en la región norte y noroeste de la cuenca, siendo menor al sur y sureste, y menor aún al centro y hacia el este.

En el modelo de infiltración (Figura 9) se observa una mayor infiltración en la zona SSE, SE y E de la cuenca, y disminuye progresivamente en sentido opuesto, hacia el NNE.

A partir de los modelos digitales generados, se calculó el volumen total para cada una de las componentes, mediante la suma de los valores de los píxeles de cada uno de los modelos.

$$P \text{ (precipitación total)} = 410 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$$

$$Et \text{ (evapotranspiración)} = 330 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$$

$$Es \text{ (escurrimiento sup.)} = 15 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$$

$$I \text{ (infiltración o recarga)} = 65 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada uno de los modelos, del total de la precipitación anual en la cuenca de La Paz, un 80.5 % se evapotranspira, un 3.6 % escurre superficialmente y un 15.9 % se infiltra en el terreno.

El volumen de agua de lluvia que recarga la cuenca de La Paz es de aproximadamente 65 Mm³ año⁻¹. Esta recarga tiene lugar principalmente en las elevaciones montañosas ubicadas al este y sureste (sierra Las Cruces y El Novillo, Figuras 3 y 9), donde el agua de lluvia que cae al suelo se infiltra entre el material ígneo y metamórfico intemperizado, y por las grietas o fracturas, y se transporta lentamente pendiente abajo en forma subterránea y/o superficial al acuífero de La Paz que se localiza en el valle.

DISCUSIÓN

A la fecha de elaboración de este estudio no se ha estimado la evapotranspiración, escurrimiento y recarga en la cuenca de La Paz, en virtud que es el primer trabajo en que se calculan estas componentes. Se han obtenido coeficientes de escurrimiento y evapotranspiración a nivel regional en las cuencas del estado de Baja California Sur (CNA 1991; 1997; 1999) así como la disponibilidad media anual de agua de algunas regiones hidrológicas de la Península de Baja California (CNA 2005); y solo se ha estimado la recarga del acuífero de La Paz (CNA 1999; CIGSA 2001; IPN-CICIMAR/CIBNOR/UABCS 2002; Dragoo & Maddock 2004; Cruz-Falcón 2007) de lo que resalta su actual sobreexplotación y fragilidad.

Para el cálculo de la evapotranspiración en la cuenca de La Paz con la fórmula original de Turc (1961, en Custodio & Llamas 2001), con datos de precipitaciones bajas y temperaturas relativamente altas, como es característico de zonas áridas, el resultado que se obtiene sería demasiado elevado, aproximadamente 97.64 % de la precipitación (Cruz-Falcón 2007), que junto con las demás componentes se estimaría una recarga equivalente al 0.56 % de la precipitación, lo cual resulta incongruente. Por esta razón en la fórmula mencionada se utilizó un factor constante de 1.5 (Cruz-Falcón 2007) para obtener resultados más convincentes.

A pesar de que en los balances hidrometeorológicos de CNA (1991) en las cuencas del estado de Baja California Sur se indica que en los años de precipitación media o baja, del volumen precipitado se evapotranspira un 90 a 95 %, resultado muy similar al que se obtiene en la cuenca de La Paz con la fórmula de Turc sin modificar (Cruz-Falcón 2007), no se recomienda usar estos porcentajes ya que los resultados de las otras componentes hidrológicas resultarán demasiado bajos (Cruz-Falcón 2007). En otros estudios de balance hidrometeorológico realizados en lugares similares a esta región obtienen una evapotranspiración de 80.54 % (Fikos *et al.* 2005), y de 67 % (Egboka *et al.* 2006).

Debido a que la evapotranspiración varía en cada región de acuerdo con el tipo y naturaleza de

la superficie del suelo, así como por una serie de factores tales como la turbulencia local y el contenido de vapor de agua en el aire (Davis & Wiest 1971), significa que la aplicación de una fórmula empírica en una determinada región con ciertas características físico-ambientales en que se obtienen resultados específicos, no necesariamente puede aplicarse en otra región con características diferentes, y esperar obtener resultados igualmente representativos.

Por otra parte, el cálculo del escurrimiento superficial en la cuenca parece estar ligeramente subestimado. Esto se supone debido a que la fórmula empírica autorizada en la NOM-011-CNA-2000 (DOF 2002) maneja el parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, con índices relativamente bajos. La CNA (1991) utiliza un factor de escurrimiento de aproximadamente 1.06 % del total de la precipitación en todas las cuencas del estado de Baja California Sur, pero en estimaciones de otros estudios los porcentajes son realmente mayores, por ejemplo, de 19.5 % (Egboka *et al.* 2006), 18.5 % (Fikos *et al.* 2005) y de 9 a 13 % (Treviño *et al.* 2005).

A manera de conclusión, La cuenca de La Paz recibe un promedio de 410 Mm³ año⁻¹ de agua de lluvia. Dentro de ésta, la subcuenca El Novillo capta más del 50 % de la precipitación, pero además constituye la subcuenca más importante debido a su mayor superficie, tipo de suelo constituido principalmente por depósitos aluviales en las partes planas, y roca ígnea intrusiva fracturada e intemperizada en las zonas elevadas, que forma parte de las principales zonas de recarga.

Del total de precipitación que recibe la cuenca de La Paz, un 80.5 % se evapotranspira, el 3.6 % escurre superficialmente y un 16.9 % se infiltra en el terreno. El volumen infiltrado en la cuenca es de aproximadamente 65 Mm³ año⁻¹. Parte de este volumen se transporta al acuífero que se encuentra en el valle, por escurrimiento subsuperficial y por flujo subterráneo, y el resto se distribuye en forma subterránea a otras partes de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó con apoyo de los

proyectos CGPI:2003164, y CGPI:20041050 de CICIMAR-IPN. A la M.C. Sandra Robles Gil, de la CONAGUA, por su valioso apoyo en la adquisición de datos climatológicos. Al M.C. Alvaro González

Michel (Laboratorio de Agua, Suelo y Clima del CIB-NOR), por su participación en el manejo y análisis de base de datos climatológicos.

LITERATURA CITADA

- Álvarez AA, Rojas SH, Prieto MJ (1997) Geología de la Bahía de La Paz y Areas Adyacentes. En: Urbán RJ, Ramírez RM (editores) La Bahía de La Paz, Investigación y Conservación. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. 13-29 pp.
- Bridget RS, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- Castany G (1971) Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ed. Omega, Bar., España. 671 pp.
- CIGSA (2001) Estudio de Caracterización y Modelación de la intrusión Marina en el acuífero de La Paz BCS. Consultores en Ingeniería Geofísica SA de CV. Contrato CNA, GAS-013-PR01. 284 pp.
- CNA (1991) Sinopsis Geohidrológica del estado de Baja California Sur. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de administración del agua - Gerencia de aguas subterráneas. Contrato No. AC-SH-88-06. 85 pp.
- CNA (1997) Censo de Captaciones de Aguas Subterráneas y Colección de datos Geohidrológicos en la zona La Paz-El Carrizal, BCS. Comisión Nacional del Agua. Informe final, Contrato GAS-026-PR097 para ADI Construcciones S.A. de C.V. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. 173 pp.
- CNA (1999) Documento de Respaldo para la Publicación de la Disponibilidad. Acuífero BCS.-24 La Paz. Gerencia Regional de la Península de Baja California, Mexicali, B.C. Comisión Nacional del Agua. 17 pp.
- CNA (2005) Estudio para Actualizar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales Superficiales en las 85 (ochenta y cinco) Subregiones Hidrológicas de las 7 (siete) Regiones Hidrológicas 1,2,3,4,5,6 y 7 de la Península de Baja California, Mediante la Aplicación de la NOM-011-CNA-2000. Comisión Nacional del Agua. 75 pp.
- Cruz-Falcón A (2007) Caracterización y Diagnóstico del Acuífero de La Paz B.C.S. Mediante Estudios Geofísicos y Geohidrológicos. Tesis de Doctorado, IPN-CICIMAR, Diciembre de 2007. 139 pp.
- Custodio E, Llamas MR (2001) Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona. Tomo I. 556 pp.
- Davis SN, Wiest DR (1971) Hidrogeología. Ed. Ariel, Barcelona. 563 pp.
- DOF (2002) NOM-011-CNA-2000. Norma Oficial Mexicana, Conservación del Recurso Agua. Poder ejecutivo, SEMARNAT. Diario Oficial 17 de abril de 2002. 17 pp.
- Dragoo LC, Maddock T (2004) Hydrology Model for the Alternative Futures of La Paz. University of Arizona, Dept. of Hidrology and Water Resources. 16 pp.
- Egboka BCE, Nfor BN, Banlanjo EW (2006) Water Budget Analysis of Agulu Lake in Anambra State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. <http://www.bioline.org.br>. 10 (3): 27-30.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (1999) 380 New York Street, Redlands, CA. U.S.A. <http://www.esri.com>. Programa ArcView 3.2 para Sistemas de Información Geográfica. Llave ArcView: 0205NC0371, Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, CIBNOR, La Paz BCS.

- Fikos I, Ziankas G, Rizopoulou A, Famellos S (2005) Water Balance Estimation in Anthemountas River Basin and Correlation with Underground Water Level. *Global NEST Journal*. www.gnest.org. 17 (3): 354-359.
- INE (2001) La Cuenca como Unidad de Planeación Ambiental. Dr. Gustavo Manuel Cruz Bello. Instituto Nacional de Ecología. Dirección General de Protección Ambiental e Integración Regional y Sectorial, SEMARNAT. <http://www.ine.gob.mx>. p.p. 6-11.
- INEGI (1983) Cartas Geológicas impresas F12-3-5-6 G1210-11 del estado de Baja California Sur, escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Edición año 1983.
- INEGI (2000) Capas digitales de edafología y uso de suelo y vegetación del estado de Baja California Sur, escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Edición año 2000.
- INEGI (2003) Capas digitales de escurrimiento superficial y curvas de nivel, claves: G12D82-83 y F12B12-13 del estado de Baja California Sur, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Edición año 2003.
- IPN-CICIMAR/CIBNOR/UABCS (2002) Ordenamiento Ecológico Bahía de La Paz, B.C.S. Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas / Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste / Universidad Autónoma de Baja California Sur. Informe preliminar Abril, 2002. 466 pp.
- Kommadath A (2000) Estimation of Natural Groundwater Recharge. *Groundwater and Hydrogeology*. <http://ces.iisc.ernet.in> Section 7, paper 5. 7 pp.
- Peña HS, Arcos HD (2004) Estimación inicial de la recarga vertical para su introducción a modelos de simulación de flujo con la ayuda de sistemas de información geográfica. *Proyectos, Estudios y Sistemas, S.A. de C.V. Seminario Sistematización y automatización como herramienta para la gestión del agua, Expo-agua 2004, Com. estatal del Agua, Guanajuato, Gto.* 9 pp.
- Sánchez FJ (2005) Evapotranspiración. Departamento de Geología Universidad de Salamanca, España. <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>. 8 pp.
- SARH-CNA (1991) Sinopsis geohidrológica del estado de Baja California Sur. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión Nacional del Agua. Contrato No. AC-SH-88-06, Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas. 85 pp.
- Sophocleous MA (1991) Combining the Soilwater Balance and Water-Level Fluctuations Methods to Stimate Natural Groundwater Recharge: Practical Aspects. *Journal of Hydrology* 124: 229-241.
- Treviño GE, Aguirre CA, Salinas CW, Xanat AN, Verasteguil CJ (2005) Evaluación de la Producción de Agua Usando Modelos de Análisis Geográfico. *Revista internacional de Ciencias de la Tierra*. (<http://www.mappinginteractivo.com>). Artículo 105. 8 pp.