



## DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO Y ORDENACIÓN DE LA CUENCA SAN JUAN EN BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

María Z. Flores López; José Antonio Pérez Venzor y Silvia Madrid Amao

Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. Departamento Académico de Ciencias de la Tierra.  
Carretera al Sur Km 5.5, Colonia El Mezquitito, C.P. 23080, La Paz, Baja California Sur, México.  
E-mail: m.zflores@uabcs.mx

Recibido: 19/03/19

Aceptado: 31/10/2019

### RESUMEN

La cuenca hidrológica es la unidad geográfica-ambiental por excelencia para analizar las problemáticas de las aguas superficiales y su vínculo con las aguas subterráneas, sobre todo en territorios donde la aridez es una variable de entorno. Esta investigación se desarrolla en la cuenca hidrográfica de San Juan en Baja California Sur, México. Una cuenca de tipo exorreica con descarga al Golfo de California y con un área de 647 km<sup>2</sup>. El objetivo general de este trabajo es identificar los usos de suelo idóneos para la propuesta de ordenación de la cuenca, de acuerdo a las condiciones hidrológicas y geomorfológicas de la región. Para ello, se propone el análisis de datos climáticos, así como la generación de cartografía a escala de cuenca; y se obtienen parámetros de caracterización hidrológica, como las isoyetas anuales y estacionales. Adicionalmente, se generan otras variables hidrológicas de interés. Entre los resultados obtenidos está la clasificación de la vegetación, el modelo de elevación digital y el establecimiento de usos de suelo mediante una metodología de ordenación de cuencas para zonas áridas. Las acciones para corregir la degradación actual de la cuenca consideran usos de suelo sostenibles y factibles de mantener en el tiempo.

**Palabras clave:** cuenca, Baja California Sur, hidrología, usos de suelo, SIG.

## HYDROLOGICAL DIAGNOSIS AND ORDINATION OF THE SAN JUAN BASIN IN BAJA CALIFORNIA SUR, MEXICO

### SUMMARY

The hydrological basin is the geographical-environmental unit par excellence to analyze surface waters issues and their link with groundwater, especially in lands where aridity is a variable of the environment. This research is carried out in the San Juan river basin in Baja California Sur, Mexico. The basin is of exorheic type with discharge to the Gulf of California and an area of 647 km<sup>2</sup>. The general objective of this work is to identify the suitable land uses for the proposed management of the basin according to the hydrological and geomorphological conditions present in the region. To this aim, a methodological approach is proposed with the analysis of data from weather stations, as well as the generation of cartography at the basin scale. Parameters of hydrological characterization were used, stories such as isohyets for the annual regime and for various seasons of the year. Additionally, other hydrological variables of interest were added. Among the results obtained, is the classification of the vegetation, the digital elevation model, and the establishment of land uses through a basin management methodology for arid areas. Actions to correct the current degradation of the basin consider sustainable and feasible land uses to maintain over time.

**Key words:** basin, Baja California Sur, hydrology, land uses, SIG.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica, además de ser una unidad hidrológica, es también una unidad físico-biológica y socio-económica para la ordenación y planificación de los recursos naturales (Sedlak, 2015). La gestión de los recursos naturales se realiza en esta unidad por diversos motivos, ya que la vida del hombre está vinculada a la cuenca y existen interdependencias entre los factores físicos y productivos de la misma considerándola entonces como un sistema dinámico (Tapia, 2012).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define a la planificación de cuencas hidrográficas como la ordenación de los recursos naturales y la restauración de ecosistemas degradados, en función del mejoramiento del bienestar y de la calidad de vida de la comunidad (FAO, 1988). La planificación física de una cuenca hidrográfica se basa en la capacidad del territorio como soporte y escenario vivo, incorporando las decisiones adoptadas en función de esas capacidades convenientemente valoradas. De esta manera, la ordenación como método planificado de acción previene los problemas que generan la ocupación y uso desordenado del territorio, los desequilibrios territoriales y las externalidades negativas que los acompañan (Brooks, 2012).

Actualmente, se emplean modelos hidrológicos integrados en la ordenación de una cuenca objeto de restauración conjugando: 1) la ordenación de los usos de la cuenca dependiendo de sus potencialidades hídricas y bioclimáticas, tratando de potenciar sus capacidades productivas y reguladoras de los recursos hídricos y 2) la ordenación del territorio tomando en cuenta las pérdidas de suelo por procesos erosivos (Mintegui y López, 1990).

La ordenación de cuencas hidrográficas condiciona los usos del suelo a la conserva-

ción del agua, el suelo, la vegetación y por consecuencia al equilibrio del ciclo hidrológico. Por otro lado, la elección final de una metodología de ordenación depende de su utilidad y alcance, lo que a su vez está condicionado a los parámetros y coeficientes que se utilice, el rigor exigido en las mediciones de los parámetros que en él intervienen, la disponibilidad de medidas con las que se cuentan y los coeficientes de ajuste obtenidos de la experiencia (Sheng, 1992). Esto no podría integrarse sin la aplicación de los modelos cartográficos, los cuales han adquirido gran importancia en el área del manejo de los recursos naturales, ya que en la actualidad existe disponibilidad de información cartográfica digital, la cual puede ser gestionada y analizada mediante la realización de combinaciones oportunas de dicha información disponible en diversos formatos (Nelson, 2010). Los modelos que expresan relaciones espaciales y que se emplean en la práctica deberán ser sencillos y fáciles en su manejo, velando por la utilidad en su aplicación. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten incorporar métodos procedentes de la planificación física a las áreas de la ingeniería que tratan sobre la hidrología forestal y la ordenación de las cuencas hidrográficas (Mellerowicz *et al.*, 1994).

Derivado de la importancia económica, política y social que presenta la degradación de los suelos, tanto en México como en el mundo, se han realizado diversos estudios para evaluar la magnitud de la superficie afectada, así como el tipo y grado de afectación. En nuestro país, se han realizado diversas evaluaciones, pero debido a diferencias metodológicas y a la escala utilizada, sus resultados no son comparables. La desertificación en México es uno de los principales problemas ambientales con graves consecuencias sociales y económicas, por lo que resulta fundamental impulsar programas de investigación sobre este tema, así como ejecutar las recomendaciones expuestas en los diferentes programas, particularmente de

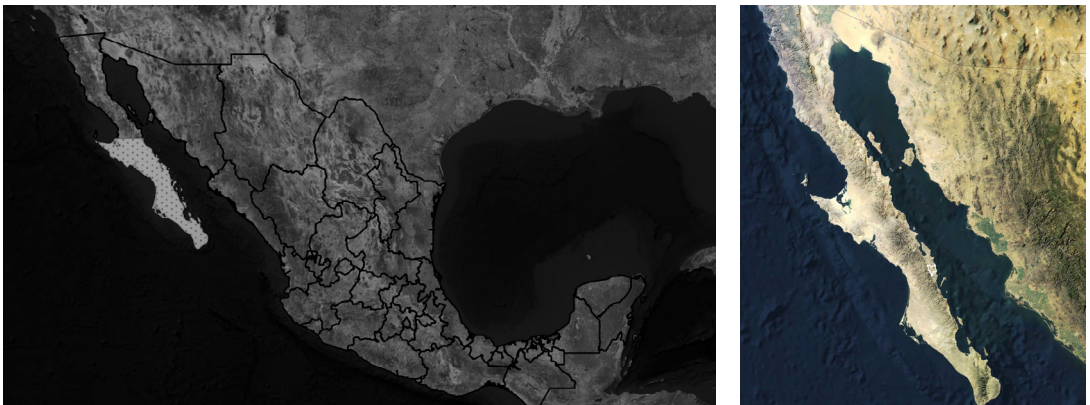
la Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras. Es también necesario enfocar y precisar los problemas de desertificación a las diferentes regiones del país, así como adecuar estas recomendaciones a ese nivel de acción (SEMARNAT y CP, 2003)

La Península de Baja California en México tiene un área de 143.600 km<sup>2</sup>, sin incluir las islas que bordean los aproximadamente 3.000 km de costa (Figura 1). Presenta pendientes escarpadas y en general las vertientes de desagüe y acantilados se orientan hacia el oriente, en el Golfo de California. Por la margen occidental, el terreno desciende en forma progresiva en amplias planicies costeras. Cuenta a lo largo de toda su extensión con una cordillera de alturas cercanas a los 3.000 m en el estado de Baja California y a los 2.000 m en Baja California Sur. Tiene una orientación sumamente característica, NO-SE, casi paralela a las costas de Sonora y Sinaloa, estados vecinos al otro lado del Golfo de California. Baja California en su conjunto es la única península notable en el continente americano por la margen del Océano Pacífico (Z. Flores, 1998).

Baja California Sur es un estado con características especiales, en relación a las demás entidades de México, pues se encuentra

atravesado por un Trópico; es alargado y angosto, y está rodeado por mares con comportamientos muy distintos uno del otro (Océano Pacífico y Golfo de California). Esto lo coloca en una posición sumamente compleja en cuanto al conocimiento de cuánta agua de precipitación puede disponerse con anticipación al período de lluvias, ya que puede haber una sequía catastrófica o una serie de chubascos y crecidas incontrolables, los que en su mayoría escurren y descargan enormes cantidades de agua al océano o al golfo.

En su totalidad, las actividades económicas y de supervivencia para el habitante sudcaliforniano dependen del recurso natural de agua dulce subterránea, al ser el estado de México el que menor tasa de precipitación (180 mm) recibe anualmente (Z. Flores *et al.*, 2010). Esta cuenca, al igual que diversas cuencas del ámbito árido sudcaliforniano, suele presentar altas tasas de erosión principalmente debido al sobrepastoreo y actividades antrópicas no reguladas. Aunado a las condiciones climáticas de la región, cobertura vegetal mayoritariamente xerófila (*Fouquieria peninsularis* Nash, *Pachycereus pringlei* (S. Watson) Britton & Rose, *Bursera microphylla* A. Gray y *Vachellia californica* (Brandeggee, Seigler &



**Figura 1.** Imágenes de satélite mostrando a la izquierda el territorio correspondiente a la República Mexicana y Baja California Sur, y a la derecha la Península de Baja California situada en la región noroeste de México, identificando a la cuenca de estudio, San Juan, en color blanco.

Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2003). México: Imagen desde el espacio. Conabio, México. Mosaico 2002 de imágenes Modis sin nubes del satélite Terra, bandas 1,4,3 (RGB), resolución espacial 250 metros, sobre un modelo digital de terreno.

Ebinger) y a la escasez del recurso hídrico, es que se considera la importancia de implementar estrategias de ordenación de cuencas para corregir los usos del suelo en la zona.

Baja California Sur, por su condición geográfica presenta microclimas que permiten cultivar más de 100 tipos y variedades de productos hortícolas, forrajes y frutales. La actividad agrícola en el estado muestra una situación dual, algunas regiones se caracterizan por la utilización de tecnología de punta con agricultura de alta inversión; mientras que en otras zonas existe un incipiente desarrollo y baja productividad, situación alusiva en buena medida al municipio de Loreto (Gobierno de B.C.S., 2015).

El estado de Baja California Sur tiene una cordillera montañosa orientada hacia el Golfo de California que desciende en altitud de norte a sur, originada geológicamente a partir de un desgarre de la corteza terrestre y a la formación del Golfo de California (Pérez, 2013). Esto dio lugar en su mayor parte a rocas volcánicas extrusivas fracturadas, a excepción del sur, en donde afloran rocas sedimentarias. Estos procesos propiciaron la formación de grandes valles en la vertiente del Océano Pacífico y cuencas de menor tamaño en la vertiente del Golfo de California. La geología, así como la hidrogeomorfología del paisaje, y los sitios favorables para la escorrentía asociadas a la red de arroyos son indispensables para entender cómo funciona el recurso hídrico en una cuenca (Thornbury, 1966).

La cuenca hidrográfica San Juan, pertenece al municipio de Loreto en Baja California Sur y presenta mayoritariamente un drenaje de tipología dendrítica. La erosión es intensa de manera vertical generando estrechos cañones o acantilados sobre la margen de los arroyos, dando lugar a un relieve juvenil, lo que puede ser observado sobre la carretera que conduce a pequeños poblados como El Cardonal y San Bruno. La precipitación es la fuente del agua que escurre, se infiltra y que controla gran parte de los procesos del ciclo

hidrológico de las distintas regiones de la FC. La distribución espacial y temporal del agua en la cuenca San Juan son requisitos para interpretar la procedencia de la fuente de humedad y cuantificar los volúmenes críticos para el correcto manejo del agua en eventos torrenciales de la región, principalmente con los ciclones en época de verano (INEGI, 1996). La recarga de los acuíferos es un proceso trascendental en zonas áridas, ya que de acuerdo al potencial de captación de precipitación que se manifieste, se almacenará el agua que finalmente constituirá la recarga de las aguas subterráneas, formaciones hidrogeológicas de las cuales dependen actividades vitales para el estado como es la agricultura y la ganadería (SARH-CNA, 1991). Poblaciones como Santa Rosalía, Mulegé, Loreto, San José de Comondú, San Miguel de Comondú entre otras, están sujetas principalmente al consumo de agua procedente de los acuíferos. Las aguas subterráneas son el almacenamiento que en buena medida a lo largo del año en Baja California Sur, ofrecen un medio para disponer del recurso hídrico, sobre todo cuando la región atraviesa por un período de secas (Z. Flores, 2010).

Para que se produzcan los resultados esperados, las actividades de ordenación de cuencas hidrográficas han de incorporar «hidrología forestal», «conservación de suelos y aguas» y «planificación del uso de la tierra» en un marco lógico amplio que tome en consideración no sólo los fenómenos físicos, sino también los factores económicos, sociales e institucionales (Figura 2). De ahí, se establece que para generar una correcta y justa ordenación de cuencas hidrográficas deban integrarse diferentes perspectivas y análisis, con visión multidisciplinaria y un enfoque de sistemas.

Esta investigación intenta dar una descripción lo más completa posible de las condiciones hidrológicas de la cuenca correspondiente a la Formación Comondú (FC) o Grupo Comondú; considerando a la topografía como



**Figura 2.** Visión de enfoque de sistemas multifactorial para la ordenación de una cuenca hidrográfica en zona árida.

una variable de importancia para un estudio hidrológico, ya que la misma permite la delimitación adecuada de la cuenca hidrográfica, red de drenaje, pendiente de la cuenca y el cauce. El objetivo general de este trabajo es establecer un ordenamiento hidrológico de la cuenca de San Juan, partiendo del diagnóstico hidrográfico mediante la caracterización de las siguientes variables: densidad de drenaje, tiempo de concentración, índice de aridez, coeficiente de Gravelius, generando una frontera de conocimiento inexistente en la región, idónea para la toma de decisiones en la asignación de usos de suelos de la propuesta de ordenación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar el objetivo planteado, se seleccionó una metodología de ordenación de cuencas con impacto en la vocación del territorio, sobre todo con aplicación en la región árida de Baja California Sur.

### Área de estudio

La cuenca San Juan es de tipo exorreica con una red de drenaje dendrítica y orientación nororiental, con un área de 647 km<sup>2</sup>

(Figura 3). El cauce principal de la cuenca es el arroyo San Juan, el cual presenta 31,5 kilómetros de extensión y tiene su desembocadura en el Golfo de California. Su tipología fluvial es principalmente meandrosa y en su punto de desagüe presenta características anastomosadas. El arroyo San Juan es una pieza fundamental de subsistencia para los pobladores locales de la zona, pues en áreas circunvecinas al arroyo se ubican parcelas de cultivo de importancia socio-económica para el devenir productivo de la región.

En el contexto geológico, la FC se encuentra localizada, tanto en el margen de Comondú, como en el de La Purísima. Está caracterizada por rocas sedimentarias, como areniscas de grano medio a grueso; algunas conglomerádicas; conglomerados soportados por clastos muy redondeados de composición volcánica, principalmente de andesitas y riodacitas, tobas y tobas retrabajadas, y grandes mesetas de basaltos (Figura 4), posiblemente transicionales, que separan el Arco Comondú con el Campo Volcánico La Purísima-Comondú (CVPC). Los ambientes de depósito de las rocas sedimentarias y volcanosedimentarias son principalmente abanicos aluviales.

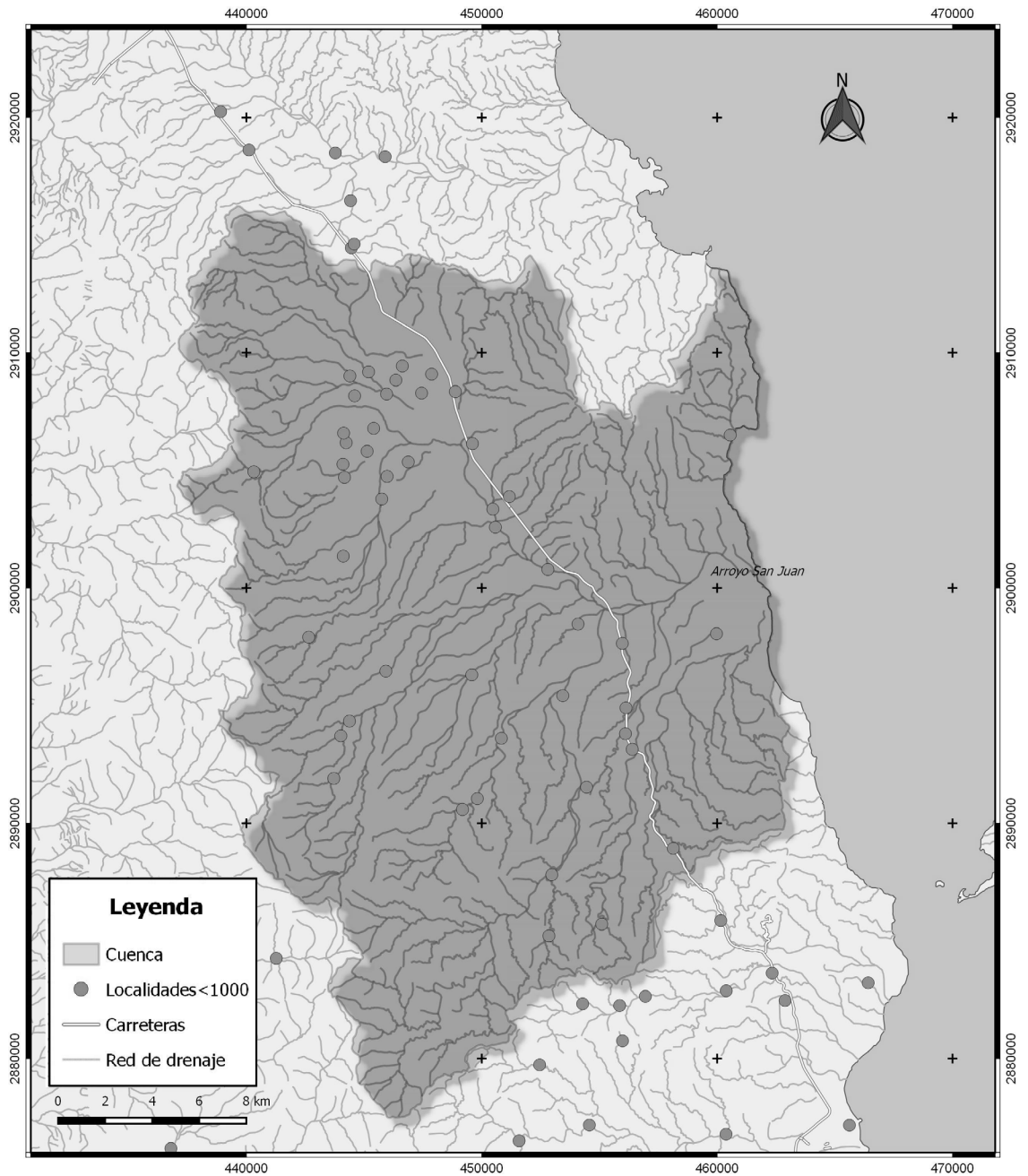
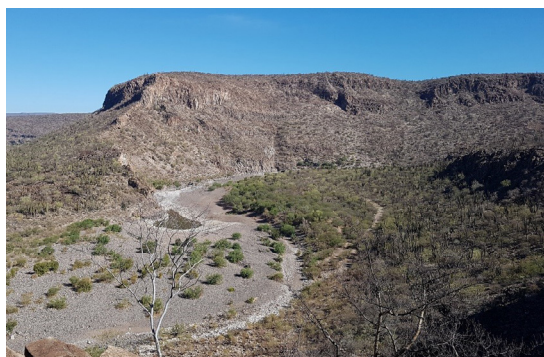


Figura 3. Red de drenaje de la cuenca San Juan.



**Figura 4.** Identificación de las mesetas de basaltos que coronan a las rocas volcanosedimentarias.

Fuente: Capturada por José Antonio Pérez Venzor.

Estas rocas pertenecen al Mioceno Medio y al Plioceno y forman el arco volcánico de Comodú (Hausback, 1984), el que se compone principalmente de tobas riolíticas, flujos de ceniza, lahares andesíticos y flujos de lava en las áreas proximales del arco. En las áreas distales (occidente), se encuentran areniscas volcánicas, conglomerados entrelazados y estratos volcanoclásticos (McLean *et al.*, 1987). Dicho arco pertenece a la Provincia Geológica de La Giganta (Ortega *et al.*, 1992).

El acuífero correspondiente a la zona de estudio se denomina San Juan B. Londó (0329) y corresponde a un valle intermontano constituido por materiales granulares depositados en una fosa tectónica, con espesores de más de 300 metros (Comisión Nacional del Agua, 2018), los que presentan una permeabilidad media y permiten la formación de un acuífero de tipo libre con un nivel relativamente cercano a la superficie. La recarga se realiza principalmente en los extremos norte y sur del valle, a través de flujo subterráneo procedente de infiltración de agua de lluvia sobre las sierras.

Considerando que la demanda de la extracción de agua subterránea se ha incrementado y que la información piezométrica disponible corresponde a los años de 1986, 2005 y 2006, se definió un área de balance de 688 km<sup>2</sup> que comprende tanto al valle de San Juan B. Londó como la zona de la desem-

bocadura de San Bruno. De esta última zona, se tiene información piezométrica y en ella se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La recarga de agua total media anual para el acuífero de San Juan B. Londó (Comisión Nacional del Agua, 2018) es de 6,7 Mm<sup>3</sup>, mientras que la descarga natural comprometida (DNC) es de 1 Mm<sup>3</sup> y el volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) para el acuífero es de 7,645272 Mm<sup>3</sup>. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" (fracciones 3.10, 3.12, 3.18 y 3.25), y "4" (fracción 4.3) de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Se destaca que, según los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, el déficit del acuífero es de solamente -1,945272 Mm<sup>3</sup>, en contraposición con numerosos de los acuíferos presentes en la región que se encuentran en estado actual de sobreexplotación. Se sugiere realizar piezometría con mayor frecuencia y llevar a cabo pruebas de bombeo en la región para tener datos actualizados a la fecha presente.

### **Análisis del medio**

Se analizaron cuatro estaciones climatológicas pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con series de tiempo mínimas de 30 años, debido a que para ese intervalo la mayor parte de las estaciones tienen datos en común y este período es suficiente para realizar pronósticos hidrológicos con relativa confianza. Este análisis fue crucial para la generación de las isoyetas y caracterizaciones hidrológicas consideradas. Las estaciones de estudio fueron San Nicolás, San Juan Londó, San Antonio Norte y Loreto.

La información recabada a partir de las diversas variables hidrológicas sirvió de apoyo para comprender el comportamiento de la cuenca desde un punto de vista hidrológico. Se caracterizó la cuenca hidrográfica de San Juan mediante parámetros generales tales como el orden de corriente o la relación de

bifurcación por Horton/Strahler, la cual sugiere la jerarquización de cauces de acuerdo al número de orden de un río/arroyo, como un mecanismo de ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica (Horton, 1945). Una relación de bifurcación baja se asocia con cuencas muy bien drenadas y que pueden generar crecidas violentas. Se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Rb = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

Donde,  $Rb$  es la relación de bifurcación y  $N_n$  es el número de cauces de un orden dado y  $N_{n+1}$  es el número de cauces del orden inmediatamente superior.

Se estimó la densidad de drenaje por Horton, para conocer la respuesta de la cuenca a una precipitación (Horton, 1945). Una cuenca altamente drenada genera poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse y percolar a nivel subterráneo, escenario valioso de interpretar en regiones áridas. La ecuación de densidad de drenaje utilizada es:

$$Dd = \frac{\sum L}{A}$$

Donde,  $Dd$  es la densidad de drenaje en  $\text{km}/\text{km}^2$ ,  $L$  es la longitud total de todos los cauces en  $\text{km}$  y  $A$  es la superficie de la cuenca en  $\text{km}^2$ .

El tiempo de concentración es el transcurrido desde el final de la lluvia neta hasta el final del hidrograma superficial generado por ella, se trata de una variable propia para cada sitio, dependiente de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia. Se estimó de acuerdo al método de Témez, el cual es utilizado en cuencas de tamaño variable, válido desde  $1 \text{ km}^2$  hasta  $3000 \text{ km}^2$  de superficie (Témez, 1991):

$$T_c = 0,3 \cdot \left[ \frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$$

Donde,  $T_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L$  es la longitud del cauce principal de la cuenca en  $\text{km}$  y  $S$  es la pendiente media del cauce principal.

Emmanuel Martonne estableció el llamado índice de aridez para llevar a cabo estudios hidrológicos, siendo utilizado también para señalar las grandes oposiciones climáticas y biogeográficas (Wang y Takahashi, 1999). Se estimó el índice de aridez de Martonne, el cual refleja las condiciones de aridez que están presentes en la zona de estudio.

$$Ia = \frac{Pa}{Tma}$$

Donde,  $Ia$  es el índice de aridez de Martonne,  $Pa$  es la precipitación anual en  $\text{mm}$  y  $Tma$  es la temperatura media anual en  $^{\circ}\text{C}$ .

El coeficiente de Gravelius ( $Kc$ ) es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área igual a la de la cuenca (López Cadenas de Llano, 1998). En ningún caso el coeficiente podrá ser menor a la unidad y en la medida que éste se acerque a este valor, la forma geométrica de la cuenca tenderá a parecerse a la de un círculo. Si asociáramos el coeficiente de Gravelius de cada cuenca con el tiempo de concentración, tendríamos que en el caso de una cuenca con mayor  $Kc$  tendríamos un mayor tiempo de concentración. Se estima mediante la siguiente ecuación:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde,  $P$  es el perímetro en  $\text{km}$  y  $A$  la superficie de la cuenca en  $\text{km}^2$ .

Se elaboró un minucioso registro hidrológico de los datos pluviométricos de las estaciones climatológicas con series diarias, posteriormente se realizó un tratamiento de estos datos para agruparlos en series mensuales y anuales, calculando medias y modas de acuerdo a los períodos: invernal (noviembre a febrero), seco (marzo a junio) y lluvioso (julio a octubre). De acuerdo a este criterio y bajo



el funcionamiento de un SIG, específicamente el software ArcGis (ESRI, 2012), se modelaron las isoyetas para cada uno de los períodos estacionales en la cuenca San Juan, se obtuvieron las superficies de dominio (Z. Flores, 1978) y se generó la cartografía a escala de cuenca para el proyecto.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, el cual permitió caracterizar el relieve y los elementos presentes en la cuenca de estudio. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular, el cual se generó utilizando el software SIG (ESRI, 2012).

Adicionalmente, se ordenaron las clases y tipos de vegetación existentes en la cuenca (Brooks, 2012) de acuerdo a las capas vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250.000, serie VI continuo nacional (INEGI 2016) mediante software SIG (ESRI, 2012). Durante el año 2018 y 2019 se llevaron a cabo dos salidas a campo a la zona de estudio en los meses de enero y mayo. En estos recorridos fue posible reconocer "in situ" la geomorfología e hidrología de la cuenca de estudio. También se identificaron las principales acti-

vidades económicas llevadas a cabo por los rancheros, o lugareños de la zona.

### Metodología de ordenación de cuencas

Se llevó a cabo el análisis de la vocación del territorio mediante la Metodología de Ordenación de Cuencas en el ámbito Árido Sudcaliforniano, MOCAS (Z. Flores, 2016), poniendo un interés particular en las áreas cercanas al cauce principal del arroyo San Juan. La caracterización del medio físico en una ordenación requiere de la selección de una serie de elementos del medio que guardan relación con las actividades propuestas, los que a su vez se dividen en sus correspondientes tipos. Se seleccionaron los siguientes elementos: influencia hídrica, uso del suelo, vegetación, pendiente, litología, erosión, influencia de las aguas subterráneas, vulnerabilidad de zonas dominadas aguas abajo, y existencia de embalses. La metodología MOCAS hace énfasis en el concepto de aptitud e impacto para cada una de las acciones propuestas en la ordenación (Figura 5). Estas son valoradas cuantitativamente en una escala establecida previamente que contempla desde el valor positivo que corresponde al 1, el indiferente que corresponde al 0, el negativo que corresponde al



Figura 5. Esquema de la metodología MOCAS.

-1 y finalmente el excluyente que corresponde a ningún valor (Z. Flores, 2016). Se trabajó bajo el concepto de análisis multicriterio, es decir mediante la superposición y multiplicación de matrices, las cuales tienen que estar capturadas en SIG con su propia asociación espacial, de ahí es que se obtienen las acciones resultantes de la ordenación.

Finalmente, se generó un análisis de los usos de suelo compatibles con el medio natural y la disponibilidad hídrica de la zona. Cada elemento del medio constituye una capa de información compuesta por una serie de recintos homogéneos. Estos elementos fueron inventariados mediante mapas resultantes a escala de cuenca elaborados a través de software SIG (ESRI, 2012). Mediante la superposición de capas se realizó una valoración para cada unidad territorial frente a las diversas acciones planteadas. Se sugiere, en la ordenación de cuencas, que mientras menor sea el número de acciones propuestas, más probable será su implementación ya que la diversificación exagerada de acciones acaba siendo redundante y poco práctica en la realidad. Los resultados de la ordenación fueron representativos de la zona de estudio, al influir en la capacidad de acogida de las actividades planificadas.

Los datos proporcionados para esta investigación proceden de fuentes y organismos oficiales tales como CONAGUA, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Se hace la acotación que numerosos datos hidrológicos utilizados en este trabajo, ya sea de carácter superficial o subterráneo, fueron de difícil acceso al grupo de trabajo. Se establece la necesidad de realizar un mayor número de estudios hidrológicos y sobre todo hidrogeológicos en la región, pues en la actualidad hay escasos estudios que se enfoquen en esta temática y la mayoría de ellos contemplan una escala regional y no de cuenca, con lo cual se presentan dificultades para caracterizar global-

mente a una escala de detalle la integralidad del sistema hidrológico.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cuenca San Juan presenta una densidad de drenaje (Z. Flores, 1978) por Horton de 1,53, mostrando una cuenca altamente dividida en su red de drenaje y una respuesta acelerada a un evento de precipitación. El índice de aridez de Martonne obtenido es de 4,69, reflejando las condiciones de aridez extrema (desierto) características en la zona de estudio. Es de esperarse que la magnitud de la escorrentía esté ligada al tiempo de concentración, por lo tanto, en esta cuenca, el coeficiente de Gravelius obtenido de 1,67, estima un tiempo de concentración acelerado y un arreglo geométrico de la línea divisoria de aguas con formato oblongo. A su vez, el tiempo de concentración, determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, para esta cuenca es de 47 minutos, indicando un tiempo rápido de respuesta para un evento de lluvia.

El modelo digital de elevación resultante de la cuenca San Juan presenta elevaciones de hasta 500 m s.n.m., las que se agrupan en una zona de alta montaña (Figura 6), localizada en la parte suroeste. En el margen central de la cuenca, se encuentran cotas asociadas a un relieve de llanura, derivados principalmente de la presencia del arroyo San Juan y su llanura de inundación.

A través de este modelo, es posible interpretar la distribución de la red de drenaje presente en la cuenca y su vínculo con la geomorfología. El orden de corriente de la cuenca es de número cinco, lo cual indica una densa red de drenaje con alta bifurcación de sus cauces, y por lo tanto una rápida respuesta de la cuenca para transportar caudal líquido y sólido ante un evento hidrometeorológico, ya sea de carácter ordinario o extraordinario.

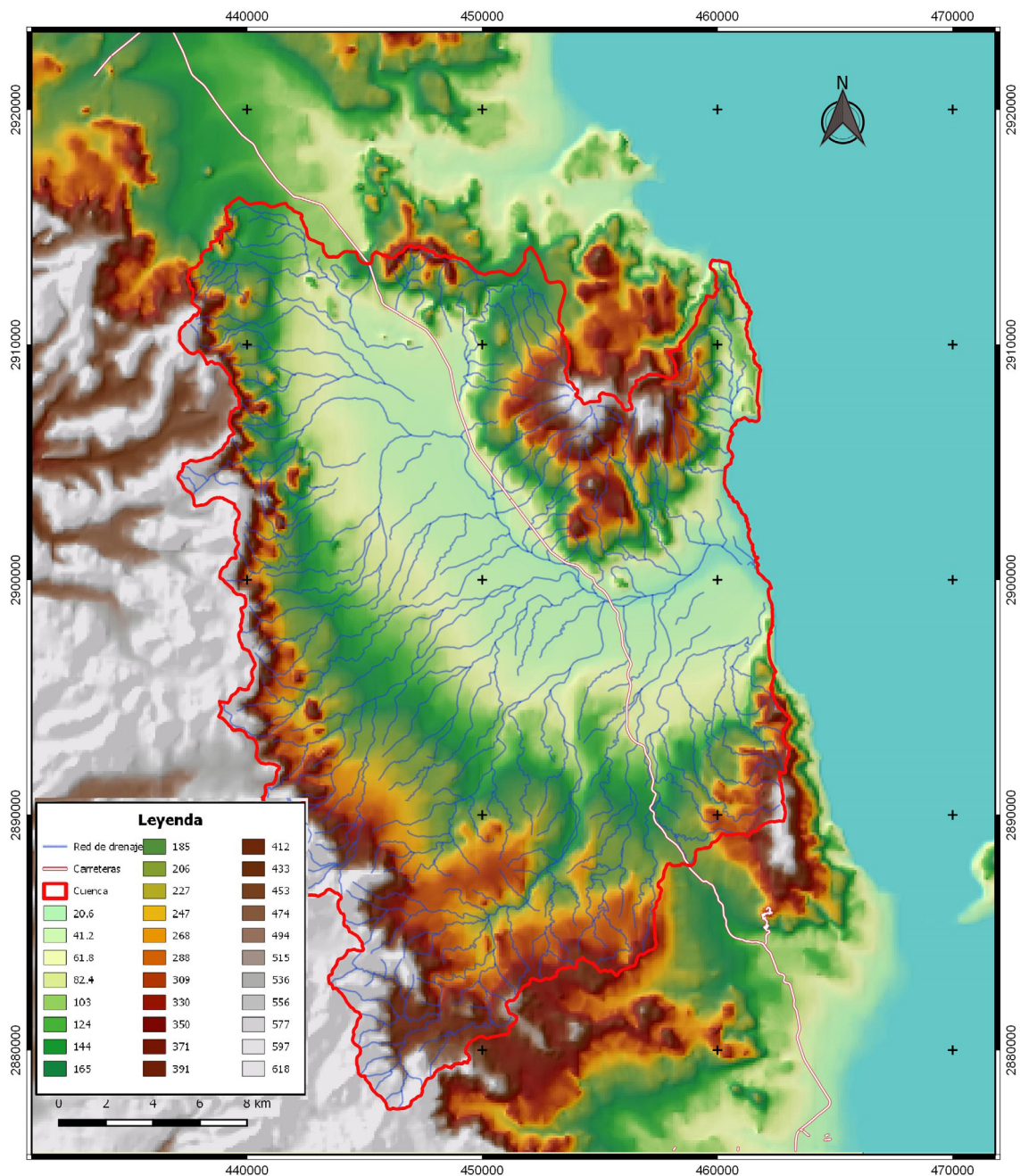


Figura 6. Modelo de elevación digital de la cuenca San Juan.

En la Figura 7 se muestran las isoyetas de la lámina de lluvia promedio precipitada para la cuenca San Juan para los tres períodos estacionales y su distribución en el espacio de acuerdo a la serie pluviométrica de 30 años. El período lluvioso registra una lámina de precipitación de 149,32 mm, mientras que el período seco presenta apenas 11,52 mm (Cuadro 1). En el primero, los eventos en los que se presenta una alta precipitación son poco frecuentes, frente a los que son moderados. Se observaron diferencias significativas tras la comparativa de cada banda de lluvia y su distribución en el espacio, entre la superficie dominada por la precipitación del período seco y la precipitación del período lluvioso sobre la cuenca, existiendo una diferencia de 66 km<sup>2</sup> de dominio entre ambos períodos. Las tasas de precipitación aumentan hacia el sur de la cuenca en el período lluvioso; mientras que en el período seco se elevan las tasas de precipitación hacia el oeste de la cuenca. El período lluvioso y el anual son los que guardan mayor similitud en cuanto a su distribución en el espacio, mostrando el resto de las isoyetas diferentes distribuciones espaciales (Figura 7).

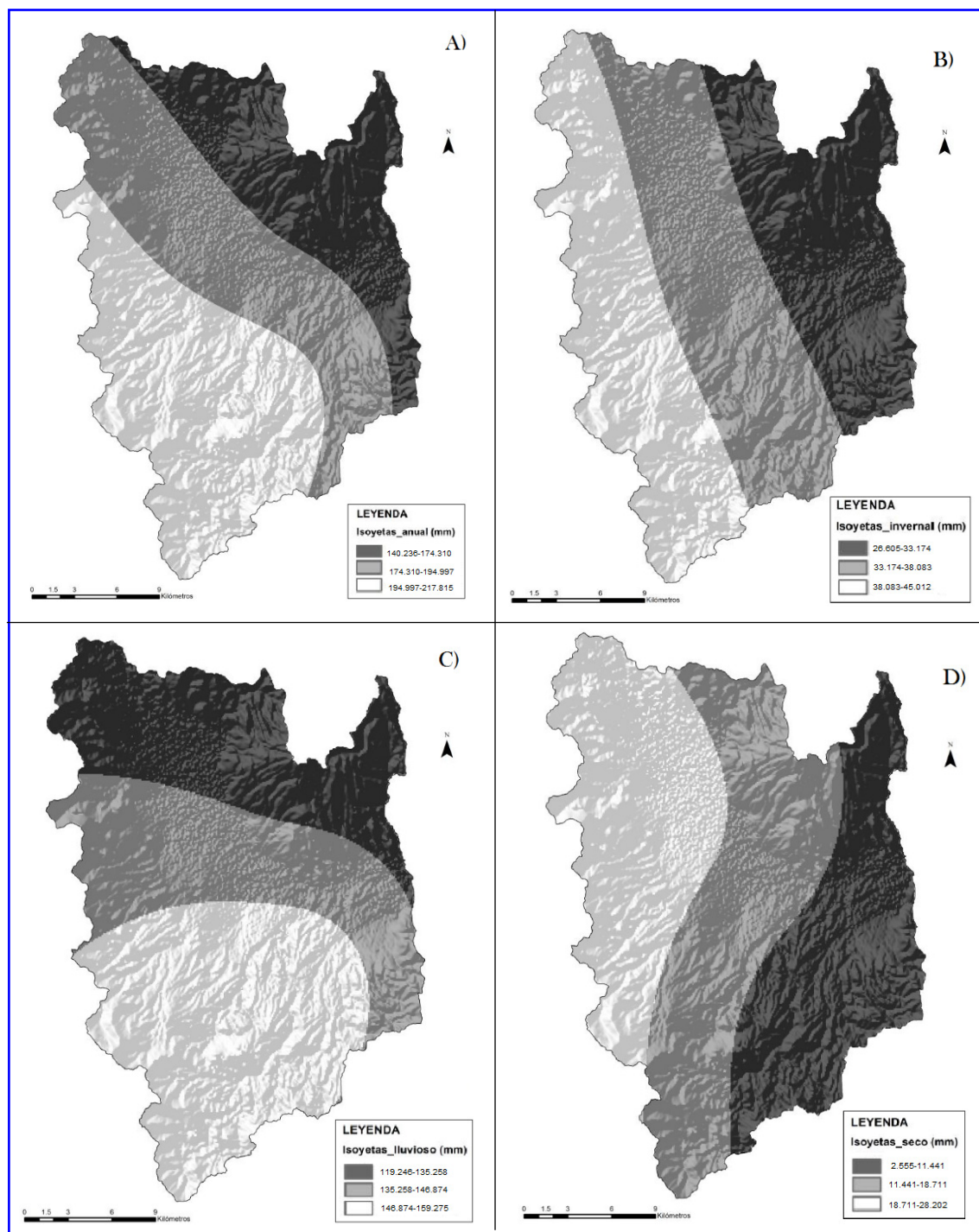
Un mapa de isoyetas es un documento básico dentro del estudio hidrológico de una cuenca, no solamente permite cuantificar el valor medio de precipitación, sino que representa gráficamente la distribución espacial de la precipitación para un período considerado. En función de los valores promedio de la precipitación y con el área total de la cuenca se obtuvieron los volúmenes promedio (m<sup>3</sup>) precipitados para cada período (Cuadro 1). Este tipo de análisis estacional es relevante cuando la región analizada presenta escenarios de vulnerabilidad relativos al recurso hídrico. Se considera un coeficiente de escorrentía del 6% por tratarse de una zona montañosa (INEGI, 1996), del cual es posible obtener un promedio anual de escorrentía en la cuenca San Juan de  $7,31 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

**Cuadro 1.** Volumen promedio precipitado para cada período estacional en la cuenca San Juan.

Período	Lámina de Precipitación (mm)	Volumen de Precipitación (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Anual	188,85	122
Invernal	33,74	22
Seco	11,52	7
Lluvioso	149,32	97

El propósito primordial en la vocación del uso del suelo en una cuenca es el de potencializar el uso de suelo territorial de tal forma que se incremente la producción agropecuaria de manera sostenible y adecuada a la capacidad de dicho recurso, lo cual además de contribuir a mejorar el nivel de vida, genera un entorno adecuado a la conservación, protección y recuperación de los recursos naturales. Cerca de 60 millones de hectáreas en México tienen condiciones naturales de clima y altitud que podrían albergar matorrales. Sin embargo, de ellas solamente 44,9 millones de hectáreas tenían matorrales en 1970, las que paulatinamente se han sustituido por terrenos agrícolas o pecuarios con su consecuente desmonte. En 2002, la superficie ocupada por matorrales se redujo a 44,2 millones de hectáreas por la conversión de poco más de 607.000 hectáreas a terrenos agrícolas o pecuarios y la degradación de alrededor de 202.000 hectáreas a matorrales secundarios (Challenger y Soberón, 2008).

En la cuenca San Juan existen diferencias en los usos del suelo, presentando la distribución del matorral xerófilo (*F. peninsularis*, *P. pringlei*, *B. microphylla* y *V. californica*) contra el área dominada por la actividad agrícola, un dominio 10 veces mayor. Es decir, la cubierta del matorral frente a la presencia de los cultivos en la cuenca es amplia, lo cual indica la crucial influencia de esta vegetación para la ordenación (Cuadro 2) y para los servicios ambientales que prestan, entre los cuales se encuentran los de regulación de nutrientes, polinización, control biológico, hábitat, y refugio de especies endémicas.



**Figura 7.** Isoyetas de la precipitación media anual (A), del período invernal noviembre a febrero (B), del período lluvioso julio a octubre (C) y del período seco marzo a junio (D), de la cuenca San Juan.

Los conjuntos de datos de la carta de aguas subterráneas a escala 1: 250.000 Serie I, contienen datos obtenidos en muestreos en campo a escala regional (INEGI 2000). De acuerdo a los datos anteriores y las capas vectoriales integradas en esta carta, se elaboró el mapa de disponibilidad de las aguas subterráneas. Se identifica que la zona ocupada por el arroyo San Juan es un sitio de material no consolidado con posibilidades altas de extracción de agua, con casi el 22% de la superficie total de la cuenca (Figura 8). En cambio, la zona suroeste presenta un material no consolidado con posibilidades bajas de aprovechamiento de agua subterránea del acuífero.

**Cuadro 2.** Superficie ocupada por los diferentes tipos de vegetación y por las actividades agrícolas en la cuenca San Juan.

Vegetación existente	Km <sup>2</sup>	Porcentaje de dominio (%)
Matorral xerófilo	498,527	77,05
Agrícola-pecuaria-forestal	50,476	7,80
Sin vegetación aparente	44,206	6,83
Vegetación inducida	0,708	0,12
Bosque de encino	4,665	0,72
Improductivo	48,420	7,48

Las cuencas hidrográficas desempeñan una función vital pues mediante el suministro de agua dulce, la regulación de la escorrentía, provisión de servicios ambientales y los impactos que generan sus tierras agrícolas contribuyen a la grandeza y bienestar de las sociedades allí presentes. Una ordenación adecuada de la cuenca hidrográfica permite prevenir su degradación y recuperar las que ya se encuentran degradadas.

Las cuatro acciones planteadas en uso futuro según la metodología MOCAS (Figura 9) utilizada en esta investigación son las siguientes:

1. Área propicia para cultivo, poblaciones (acceso al recurso agua). Estas zonas están constituidas por terrenos que se encuentran en el límite para poder em-

plearse para la agricultura y asentamiento de poblaciones con un ordenamiento territorial adecuado. En el caso hipotético se asignará preferentemente un cambio de uso forestal a agrícola. Para realizar estos cambios, se deberá analizar la rentabilidad económica que puedan generar estas parcelas, estando vinculadas a las demandas y los costos de ejecución en el momento de la ordenación.

2. Continuar el arbolado. Restaurar los matorrales degradados Existen coincidencias de distintos usos en las mismas zonas. Mantener las áreas forestales existentes mediante prácticas de conservación. Restaurar las superficies degradadas en función de los costos de operación.
3. Mantener, restaurar el monte arbolado. En las zonas de alta montaña de la cuenca, mantener el monte arbolado. Restaurar las parcelas con procesos de erosión hídrica.
4. No existen limitaciones para el uso agropecuario del suelo, siempre que se mantenga una planeación estratégica de los recursos naturales y el medioambiente de la zona y que no haya otros factores a considerar como pueden ser la protección de inundaciones frente a posibles núcleos urbanos y la implementación de mejoras forestales para incrementar la recarga de acuíferos en la región.

El resultado final que se obtiene es una capa de información que muestra una zonificación de la región de estudio, asignando a cada área una puntuación en función de su capacidad de acogida (Z. Flores, 2016). Al realizar un análisis multicriterio, la información final expresa el valor del conjunto por su capacidad en relación al criterio estudiado. Finalmente, tras un tratamiento alfanumérico y espacial en SIG (ESRI, 2012), se obtiene como resultado el mapa final de Ordenación de Cuencas según MOCAS (Figura 9) para la cuenca San Juan y sus respectivas superficies de actuación.

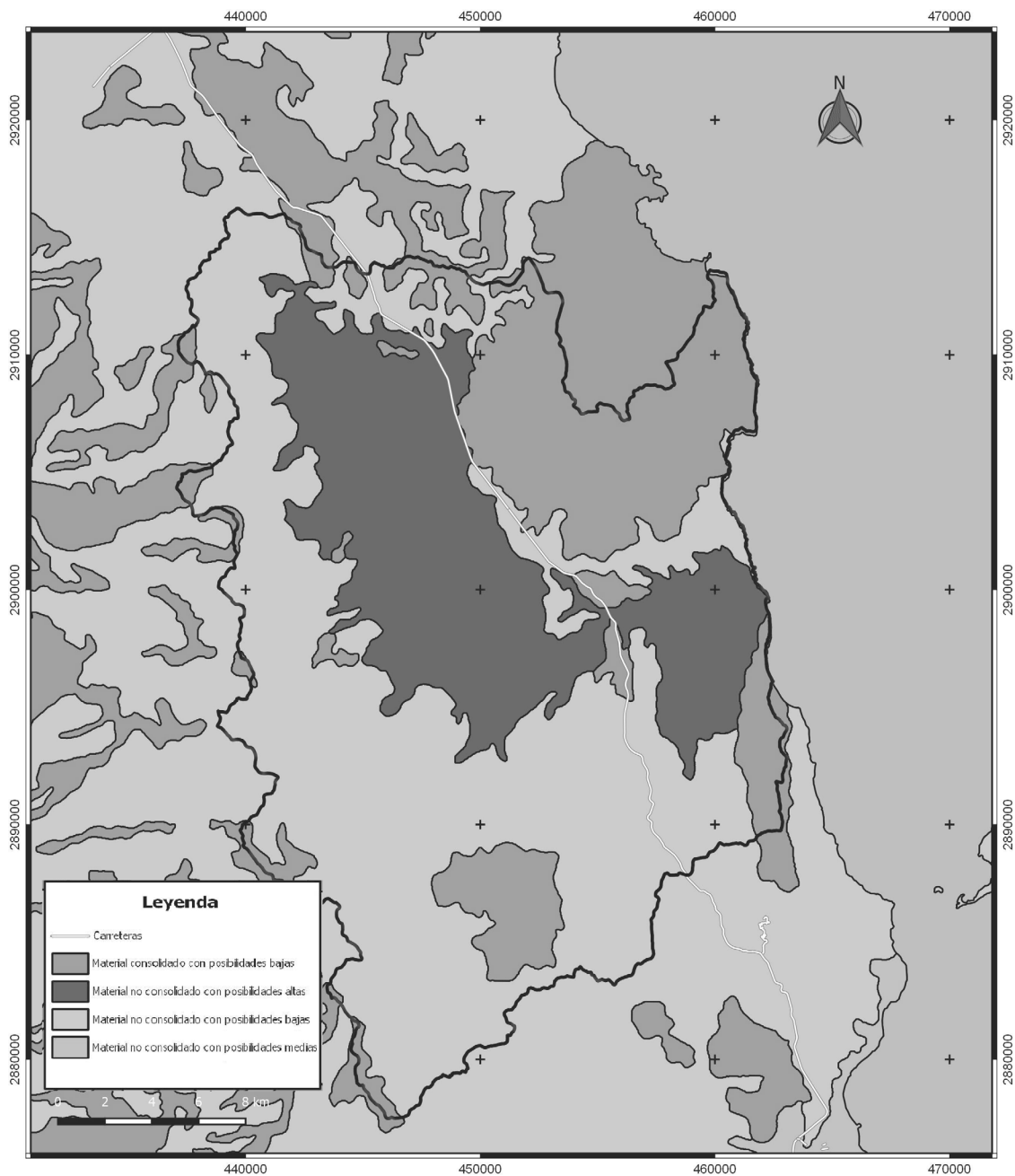


Figura 8. Disponibilidad de agua subterránea en la cuenca San Juan.

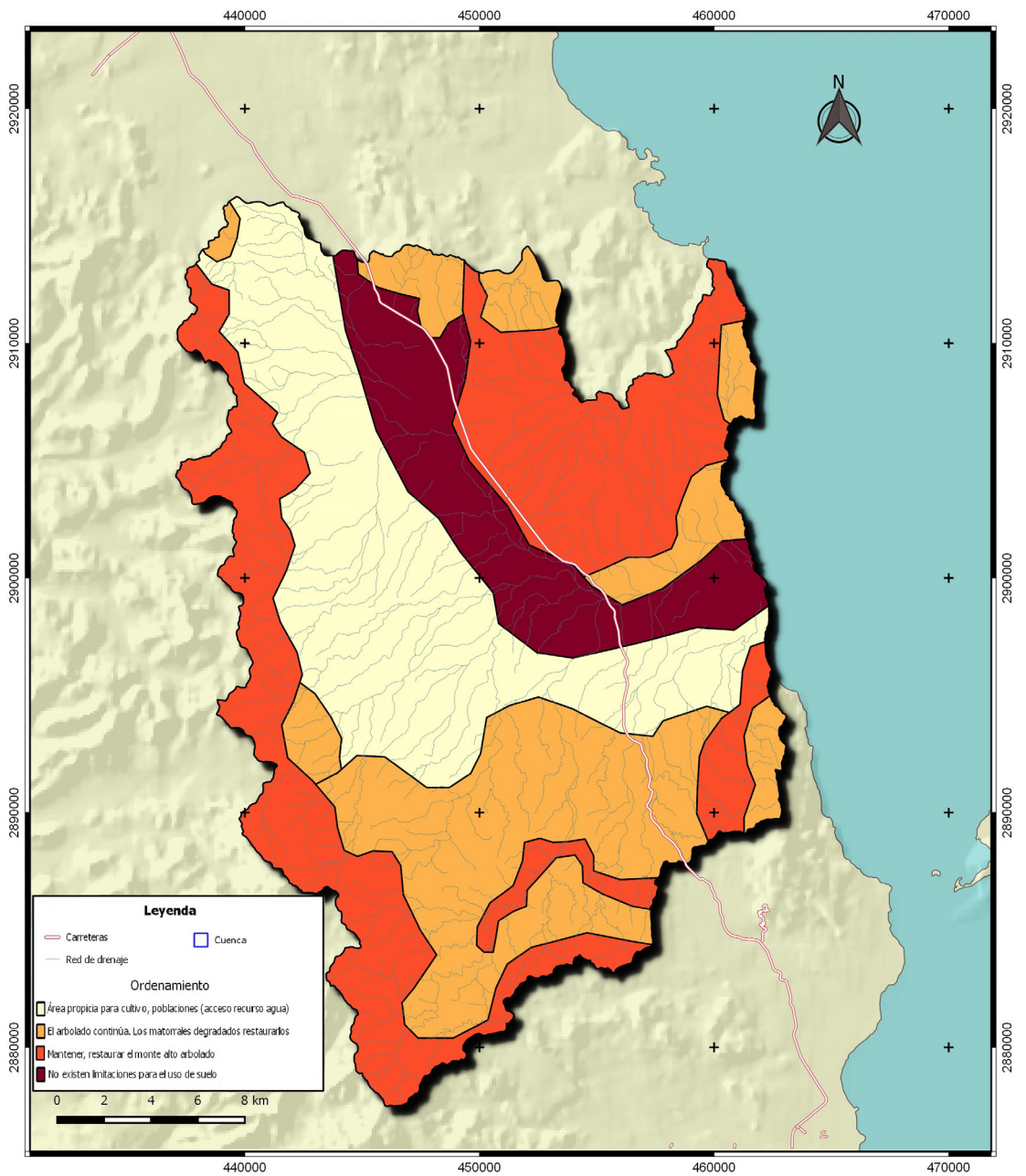


Figura 9. Ordenación resultante de la cuenca San Juan.



La ordenación resultante delimita el área propicia para la agricultura y el acceso al recurso agua para los núcleos poblacionales identificados, con un dominio del 30% del total de la superficie de la cuenca (Cuadro 3), sobre todo en zonas aledañas al cauce del arroyo San Juan. Después de corroborar los resultados obtenidos en la ordenación con la salida a campo realizada, se sugiere como acción inmediata la restauración de matorrales, sobre todo en las zonas de alta montaña de la región suroeste de la cuenca. Sólo se pueden llevar a cabo actividades sin limitaciones para el uso agropecuario del suelo en el 12% de la superficie total de la cuenca, lo cual muestra que más del 80% de la cuenca ofrece algún tipo de servicio ambiental que es conveniente mantenerlo en el tiempo, sobre todo por tratarse de una región árida con problemáticas severas de acceso al recurso hídrico.

Haciendo una comparación de los usos de suelo resultantes de la ordenación y los usos de suelo actuales (Cuadro 2) en la cuenca, se observa que existe una diferencia espacial significativa en los territorios dedicados para la actividad agrícola. Actualmente, los lugares de la cuenca San Juan acotan espacios menores a esta actividad primaria porque consideran que el acceso al recurso hídrico es complicado en otras zonas. A partir de la ordenación propuesta, considerando las variables hidrológicas analizadas, se identifica un área propicia para cultivo de 179,4 km<sup>2</sup>, con el 28% de dominio de la cuenca, frente al 8% de dominio actual. Situación que deri-

varía en una derrama económica adicional al desarrollo precario de la zona.

La ordenación de la cuenca hidrográfica de estudio comienza con lo que se denomina la caracterización de la cuenca y su entorno, la que examina la distribución espacial del drenaje natural, con el fin de obtener un panorama integral del funcionamiento de las variables hidrometeorológicas. Los resultados de ese diagnóstico descriptivo fueron utilizados para la aplicación de la metodología de ordenación de cuencas. La caracterización debe proporcionar un conjunto de antecedentes y aspectos dependiendo de la disponibilidad de información y monitoreo de las propias características de la cuenca. Su relevancia radica en que esta no debe derivar en interpretaciones del estado de la cuenca, sino describir el entorno físico en términos necesarios para comprender su situación actual de cara para actuaciones futuras en la misma. Se deberá hacer énfasis en la capacidad de seleccionar el mejor uso de suelo posible en la ordenación de la cuenca San Juan, teniendo en cuenta su fragilidad frente a las condiciones de aridez y su potencialidad para adaptarse a los fenómenos de ocupación poblacional que en ella se presentan, y evitar la ejecución de acciones y gestiones que generen un impacto negativo a largo plazo en los procesos hidrológicos.

## CONCLUSIONES

La principal actividad sugerida en la ordenación de la cuenca San Juan es el mantenimiento

**Cuadro 3.** Superficie ocupada por las actividades de ordenación en la cuenca San Juan.

Actividades de ordenación según MOCAS	Superficie en km <sup>2</sup>	Porcentaje (%)
Área propicia para cultivo, existencia de poblaciones (acceso al recurso agua)	179,40	27,73
Continuar el arbolado y restaurar los matorrales degradados	177,50	27,43
Mantener y restaurar el monte arbolado	210,0	32,46
No existen limitaciones para el uso agropecuario del suelo	80,10	12,38
<b>TOTAL</b>	<b>647,00</b>	<b>100,00</b>

y la restauración de los montes, seguida de un monitoreo constante destinado a la conservación de los matorrales presentes, debido a que el sobrepastoreo es una de las causas principales de deterioro ambiental ya que, junto con los desmontes para la agricultura, ocasiona pérdida de la vegetación a causa de la compactación y erosión del suelo.

Por otra parte, en la cuenca San Juan las láminas de precipitación registradas son enfáticamente bajas (<200 mm), por lo cual es conveniente generar un análisis por períodos estacionales, dada la escasa precipitación que se tiene en la región. De acuerdo a los resultados derivados del análisis de isoyetas, es adecuado llevar a cabo el análisis de pluviometría en regiones áridas utilizando la variable moda de la precipitación (período lluvioso), debido a que la lluvia sólo acontece en períodos muy específicos del año, mientras que en el resto de los meses del año se presentan períodos extensamente secos, por lo cual la variable de promedio no es representativa a nivel global. Los resultados obtenidos a través de la ordenación en la cuenca San Juan reafirman la importancia de una correcta gestión integral de cuencas, y de acciones futuras que ralenticen el flujo hídrico para procesos de recarga en acuíferos, sobre todo en los per-

tenecientes a zonas áridas, donde la vegetación es escasa y difícil de conservar y los requerimientos del recurso hídrico son cada vez mayores.

A pesar de las condiciones de vulnerabilidad en cuanto al recurso hídrico, en la ordenación resultante existen zonas específicas de la cuenca (179,4 km<sup>2</sup>) donde se considera un uso del suelo propicio para el desarrollo de actividades agrícolas y asentamientos humanos con carácter sostenible y con posibilidad de acceso al recurso agua, específicamente en el contexto espacial de cercanía al arroyo principal de la cuenca. En la región noroeste mexicana, existen cuencas hidrográficas con condiciones bioclimáticas considerablemente homogéneas, con carestía del recurso hídrico y contextos de sobreexplotación de los acuíferos. A través de la ordenación de cuencas hidrográficas se plantean alternativas de manejo y gestión del agua y los recursos en zonas áridas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Programa para el Desarrollo Profesional Docente en México, para el Tipo Superior (PRODEP) que mediante su financiamiento fue posible llevar a cabo este proyecto de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Brooks, K. (2012). *Hydrology and the management of watersheds*. Minnesota, Estados Unidos: Wiley-Blackwell. 562 pp.
- Challenger, A. y J. Soberón. (2008). *Los ecosistemas terrestres en capital natural de México, vol. I; Conocimiento actual de la biodiversidad*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Juan B. Londó (0329)*. Estado de Baja California Sur. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/BajaCaliforniaSur/DR\\_0329.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCaliforniaSur/DR_0329.pdf)
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. (2012). *ArcGIS Release 10.1*. Redlands, Estados Unidos: Environmental Systems Research Institute.
- FAO. (1988). *Manejo integrado de cuencas hidrográficas en América Latina*. Santiago de Chile: FAO Oficina Regional de América Latina.
- Hausback, B. P. (1984). *Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico: in Frizzell, V.A., Jr. (ed.). Geology of the Baja California Peninsula: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section (Vol. 39)*.

- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 56, 275-370. Recuperado de: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/56/3/275/4075/EROSIONAL-DEVELOPMENT-OF-STREAMS-AND-THEIR?redirectedFrom=fulltext>
- INEGI. (1996). *Estudio hidrológico del estado de Baja California Sur*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI. (2000). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de aguas subterráneas escala 1:250 000 serie I. Clave: G1205. Nombre: Loreto*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Edición: 1*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México: INEGI.
- Lang, R. (1915). *Versuch einer exakten klassifikation der böden in klimatischer und geologischer Hinsicht*. Stuttgart, Alemania: Int. Mitt. F. Bodenkunde.
- López Cadenas de Llano. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de erosión*. Madrid, España: Editorial Mundi Prensa. 945 p.
- Martonne H. (1957). *Traité de Géographie Physique*. Tome 1. Armand Cola. Paris, Francia: Le Globe.
- McLean, H., B. P. Hausback y J. H. Knapp, (1987). *The geology of west-central Baja California Sur, Mexico*. Estados Unidos: U.S. Geol. Surv. Bull., 1579 p.
- Mellerowicz, H.W. Rees, T.L. Chow y I. Ghanem. (1994). Soil conservation planning at the watershed level using the Universal Soil Loss Equation with GIS and microcomputer technologies: a case study. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 194-200. Recuperado de: <http://www.jswconline.org/content/49/2/194.short>
- Mintegui, J. A. y López, F. (1990). *La ordenación agro-hidrológica en la planificación*. España: Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria. 306 p.
- Nelson, B. L. (2010). *Stochastic modeling (analysis and simulation)*. Illinois, Estados Unidos: Dover Books.
- Ortega, F., Mitre, L. M. y Roldán, J., (1992). *Carta geológica de la República Mexicana*. México: Consejo de Recursos Minerales y en el Instituto de Geología de la UNAM.
- Pérez-Venzor, J. (2013). *Estudio geológico geoquímico del borde oriental del bloque Los Cabos, Baja California Sur, México*. México: UNAM, 394 p.
- SARH-CNA. (1991). *Sinopsis geohidrológica del estado de Baja California Sur. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH)-Comisión Nacional del Agua (CNA)*. México: Subdirección General de Administración del Agua, Aguas Subterráneas. 85 p.
- Sedlak, D. (2015). *Water 4.0: the past, present, and future of the world's most vital resource*. Estados Unidos: Yale University Press.
- SEMARNAT y CP. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250.000*. México: SEMARNAT.
- Sheng, T. C. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas, estudio y planificación de cuencas hidrográficas*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Tapia, J. C. (2012). *Modelación hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos*. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Témez, J.R. (1991). *Extended and improved rational method*. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. Vol. A: 33-40 p.
- Thornbury, W. (1966). *Principios de geomorfología*. Buenos Aires, Argentina: Ed. Kapelusz. 643 p.
- Wang, Q. y Takahashi, H. (1999). A land surface water deficit model for an arid and semiarid region: Impact of desertification on the water deficit status in the Loess Plateau, China. *Journal of Climate* 12(1): 244-257 p. Recuperado de: [https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520\\_0442%281999%29012%3C0244%3AALSWDM%3E2.0.CO%3B2](https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520_0442%281999%29012%3C0244%3AALSWDM%3E2.0.CO%3B2)
- Z. Flores, E. (1978). *Hidrología superficial*. Hermosillo, México: Universidad de Sonora.
- Z. Flores, E. (1998). *Geosudcalifornia, geografía, agua y ciclones*. México: Universidad Autónoma de Baja California Sur. 255 p.

- Z. Flores, E., Pérez-Venzor, J. y Rodríguez, M. (2010). *Estudio hidrológico para La Reserva de la Biósfera Sierra la Giganta y Guadalupe (RBSGG), Baja California Sur, México*. La Paz, México: UABCS-Niparajá, A.C 152 p.
- Z. Flores, M. (2016). *Metodología para la ordenación de cuencas hidrográficas en el ámbito biogeográfico árido sudcaliforniano (México)*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Gobierno de B.C.S. (2015). *Plan Estatal de Desarrollo. Ejes rectores del desarrollo Estatal 2011-2015*. Baja California Sur, México: Gobierno de B.C.S.