

APLICACIÓN DE TRES MÉTODOS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL EN LA REGIÓN DE PUERTECITOS-SAN LUIS GONZAGA, B.C.

José L. García-Puga¹ y Hinojosa-Corona, A.²

¹ Centro de Sismología y Volcanología de Occidente (SisVOc), Universidad de Guadalajara

² Depto. de Geología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

E-mail: puga@pv.udg.mx

RESUMEN

Se realizó la caracterización de la hidrología superficial en la franja costera comprendida entre las localidades de Puertecitos y San Luis Gonzaga, en la costa oriental de Baja California, aplicando tres métodos implementados en diferentes sistemas de información geográfica (SIG) que operan sobre representaciones matriciales del relieve del terreno, conocidas también como modelos digitales del terreno (MDT). El primer método utiliza el SIG Arc/Info; el segundo fue desarrollado para el SIG GRASS. Ambos extraen parámetros hidrológicos a partir del análisis de un MDT, como son el delineado de parteaguas entre cuencas, dirección y acumulación del flujo. El tercer método es un programa de aplicación conocido como Rivertools, que extrae diversos índices hidrológicos, así como patrones de la red hídrica con una mayor definición.

Con el método de Arc/info se logró identificar 9 cuencas, definiendo claramente la red hídrica regional. El método de GRASS fragmentó la misma área en 22 cuencas. El programa Rivertools además de calcular parámetros hidrológicos importantes, generó una clasificación hidrológica con el modelo de Horton-Strahler, creando órdenes jerárquicos para las 22 cuencas calculadas por el segundo método, definiendo a la cuenca Matomí como la cuenca de mayor importancia. Se concluye que mientras Arc/info traza mejor la red hidrológica superficial, GRASS segmenta y delinea mejor los perímetros de las cuencas. La caracterización hidrológica con mayor extracción de índices la realiza Rivertools.

INTRODUCCIÓN

En la década de los ochenta y principalmente durante los noventa, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los modelos digitales del terreno (MDT), se han aplicado en los ámbitos de impacto ambiental, planeación regional y de zonas urbanas, cambios en la vegetación y uso del suelo, exploración de recursos no renovables y en estudios de riesgo geológico (Longley y Batty, 1996; ER-Mapper, 1995; Bonham-Carter, 1997; Birkin *et al.*, 1996; Berry, 1997; López Blanco, 1994). Estas herramientas contribuyen a la sistematización de los procesos de análisis espacial, facilitando las tareas de planeación regional y de soporte en la toma de decisiones. Los estudios enfocados a la evaluación y administración de los recursos hídricos son importantes, ya que éstos inciden en la viabilidad de proyectos de desarrollo regional, en especial en zonas áridas como la península de Baja California.

Este trabajo es parte del proyecto "Caracterización de recursos naturales de la zona costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga, Baja California, apoyada en imágenes multiespectrales de alta resolución", que realiza el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Los resultados obtenidos de este trabajo contribuirán a la integración de información hidrológica del corredor turístico costero San Felipe a San Luis Gonzaga, B.C.

El área de estudio se localiza en la margen oriental de la península de Baja California. Tiene aproximadamente 100 km de longitud por 30 km de ancho entre los paralelos 29°15', 30°45'N y los meridianos 115°30', 114°15'W, dentro de la delegación municipal de Puertecitos, municipio de Ensenada, donde las localidades con mayor población son Puertecitos y San Luis Gonzaga, que se abastecen de pozos ubicados en el cauce del arroyo Matomí y del arroyo Santa María respectivamente. La precipitación promedio anual para la zona es menor a los 100 mm. Sin embargo, ocasionalmente se presentan eventos, tales como el huracán Nora, que en 1997 cruzó la región, generando una precipitación de 300 mm en un periodo de 24 horas.

Fisiográficamente, según INEGI (1982, 1984, 1995), la zona se ubica en un 95% en la sub-provincia de sierras de Baja California y el restante 5%, en la subprovincia del desierto de Altar, al que pertenece el NE de la entidad.

En esta zona, se han realizado estudios de regionalización hidrológica a escala estatal por parte del INEGI (1984, 1995). De acuerdo con éstos, se definen dos regiones estatales, la región RH4 (Baja California Noreste) y la región RH5 (Baja California Centro-Este). La región hidrológica RH4 abarca la zona de estudio a través de la cuenca regional A y sus subcuencas "a, b y c", cubriendo una extensión territorial de 2,498 km² (Figura 1). La región hidrológica RH5 está compuesta por dos cuencas regionales y la zona de estudio se ubi-

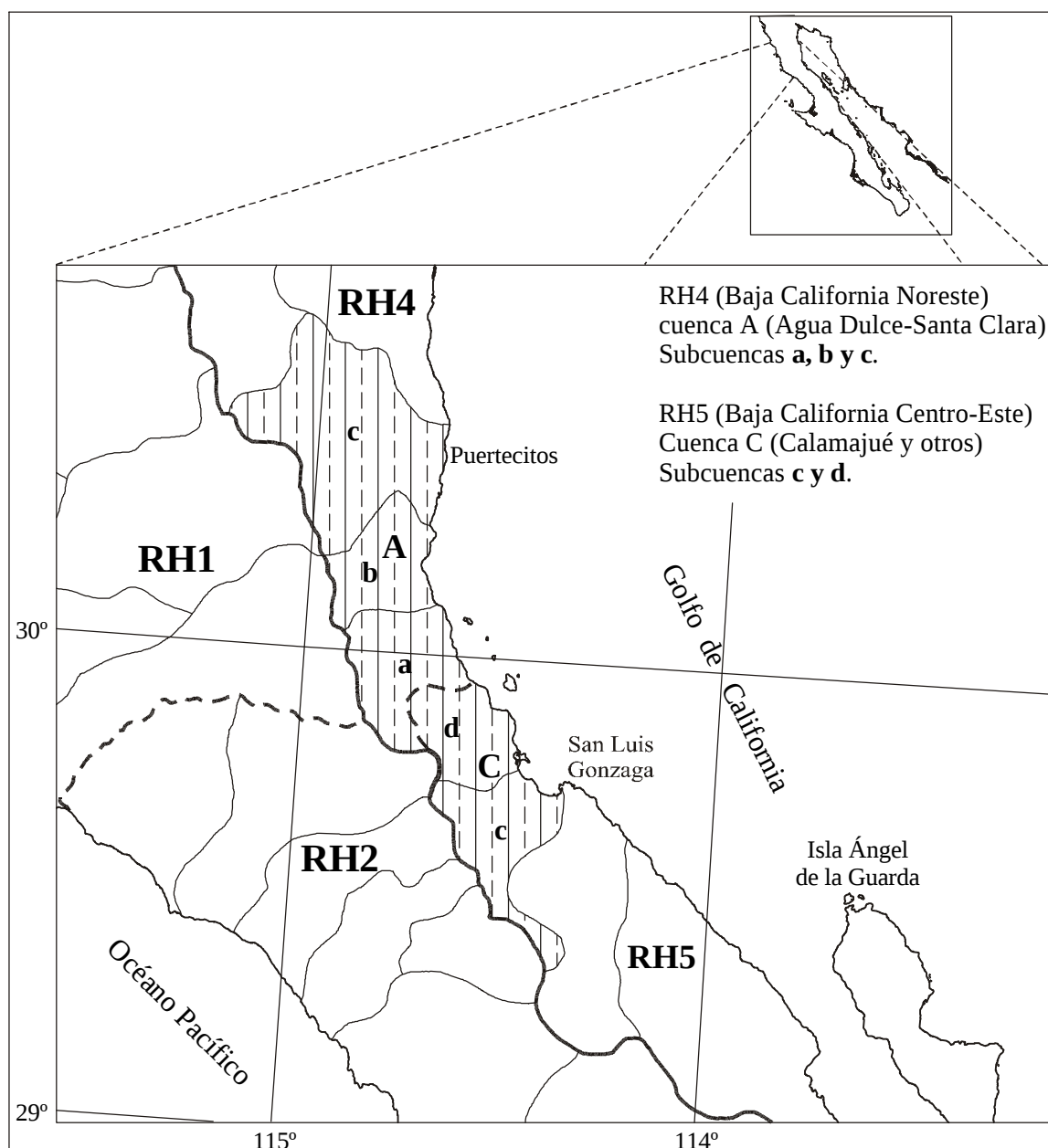


Figura 1. Localización de la zona de estudio, mostrando las regiones hidrológicas estatales, cuencas y subcuencas. Modificado de INEGI (1984; 1995).

ca en la cuenca regional C. Esta cuenca, a su vez, está subdividida en las subcuencas “c y d” que cubren una extensión de 1,044 km². La zona de estudio comprende entonces un total de aproximadamente 3,540 km² (Figura 1).

El principal objetivo del trabajo es caracterizar la hidrología superficial de la franja costera entre Puertecitos y Bahía San Luis Gonzaga (PSLG), utilizando un MDT. Los objetivos particulares son: evaluación de los métodos de análisis y extracción de la hidrología superficial, clasificación de patrones hídricos de acuerdo a los patrones geomorfológicos asociados, determinación de las cuencas hidrológicas y por último, integración de la información espacial generada en un SIG.

El modelado hidrológico es una de las aplicaciones más usuales de los SIG (Longley, 1996; Cialella, 1997; Franklin, 1987; Jenson, 1988). Estas herramientas computacionales operan sobre MDTs delineando cuencas, redes hidrológicas, cálculo del área de cada cuenca y longitud de los arroyos (López Blanco, 1994; Ehlschlaeger, 1989, 1991).

METODOLOGÍA

Se analizó la hidrología superficial de la zona costera PSLG por tres métodos utilizando diferentes SIG's (Arc/Info, GRASS y Rivertools). Los tres métodos extraen parámetros e índices hidrológicos a partir del análisis de un MDT, el cual se

obtuvo de GEMA (Geomodelos de Altimetría, INEGI), que contiene el relieve de la república mexicana en una rejilla regular (raster) con espaciamiento entre elementos de 3 segundos de arco, equivalente a una distancia entre celdas de aproximadamente 100 m. El diagrama de la metodología seguida en el análisis hidrológico se presenta en la Figura 2.

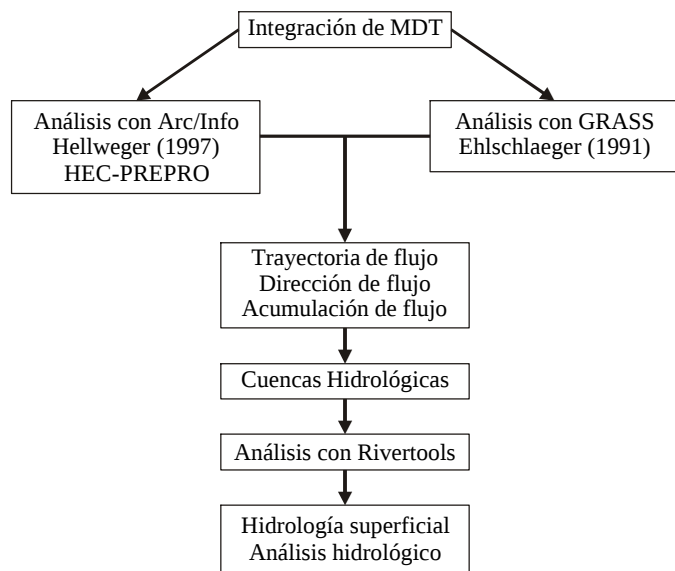


Figura 2. Esquema metodológico para el análisis hidrológico de la zona de estudio.

El primer método de análisis, HEC-PREPRO (*Hydrologic Engineering Center- PREPROcessor*), fue desarrollado por Hellweger (1997). Es un programa en lenguaje AML (*Arc Macro Language*), lenguaje de programación del sistema Arc/Info. Extrae información hidrológica del relieve a través del procesamiento de un MDT en el subsistema de rejillas, conocido como GRID.

El método HEC-PREPRO realiza dos procesos. El primero define cuencas hidrológicas a partir de parámetros que establece el usuario, tales como el área mínima de una cuenca y la longitud mínima de los arroyos. El segundo calcula la pendiente del terreno, el trazo de arroyos, dirección de flujo y zonas de acumulación. La pendiente del terreno se calcula a partir del gradiente de alturas entre celdas vecinas (Figura 3a). El trazo de flujos describe la dirección de los escurrimientos de agua en la superficie (Figura 3b), siguiendo la trayectoria de mayor pendiente (Felicísimo, 2000; Leberect, 1997-98; Fletcher, 1997). Para codificar la dirección del escurrimiento, se asigna un código a cada celda, entre un total de 8 valores distintos; cada valor representa la orientación de la celda, siguiendo el siguiente esquema: E=1, SE=2, S=4, SW=8, W=16, NW=32, N=64, NE=128 (Figura 3c). La trayectoria del flujo consiste en una matriz (rejilla o raster) donde cada celda almacena uno de los 8 valores distintos, donde cada valor indica la dirección hacia donde se dirige el escurrimiento (Figura 3d).

Finalmente, se calcula la matriz (raster) de acumulación, que contiene el número de celdas que aportan para la formación de un escurrimiento, donde cada celda almacena la suma de celdas aguas arriba que contribuyeron para la formación del arroyo (Figura 3e). HEC-PREPRO extrae la red hidrológica, como un conjunto de líneas (vectores) unidas en los nodos donde se juntan los afluentes.

El segundo método es el desarrollado por Ehlschlaeger (1991) para GRASS (GRASS, 1999). Este programa genera información similar al método anterior (red hídrica, acumulación, dirección de flujo, depresiones), con diferencias en el algoritmo aplicado y en la forma de codificar los resultados. Utiliza el algoritmo de búsqueda A^T (Ehlschlaeger, 1989), conocido como de mínimo costo, para organizar los datos de elevación y evaluar la red hidrológica. Busca la trayectoria menos costosa entre un punto de inicio y un destino, evaluando los costos según la pendiente del flujo a través de las celdas. Este método codifica los resultados utilizando una rejilla, a diferencia de HEC-PREPRO que los almacena con el modelo de vectores. En la Figura 3c se muestra el esquema utilizado para la codificación de la dirección de flujo. Para la acumulación del flujo, ambos métodos utilizan esquemas similares (Figura 3e).

En la aplicación de los métodos de Hellweger (1997) y Ehlschlaeger (1991) fue necesario estandarizar criterios en el tamaño de celdas para que los datos fueran representativos a una escala 1:100,000, además de la longitud mínima de arroyos, las áreas máximas y/o mínimas para las cuencas. La dimensión de las celdas en el MDT se remuestreó a 60 m por lado (3600 m²) y el umbral de análisis para considerar a una cuenca independiente se estableció en 1000 celdas, que representan una área de 3.6 km².

Horton (1932, 1945) introdujo un concepto de clasificación de arroyos que permite asignar valores enteros a arroyos en redes hidrológicas que determinan su importancia relativa en una jerarquía de tributarios mayores y menores. Una versión mejorada de este concepto fue introducida más tarde por Strahler (1957). Rivertools, la tercer herramienta, calcula una clasificación de arroyos aplicando el esquema jerárquico de Horton y Strahler (HS). La red está integrada por un cauce principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden desde las partes más altas hacia las partes más bajas donde convergen los escurrimientos (Sanjuame y Villanueva, 1996; Llamas, 1989; Black, 1996).

Cuando un tributario se localiza en las partes superiores de la cuenca y no recibe aporte de otro canal, por pequeño que sea, se considera de primer orden; cuando un canal recibe aportes de dos tributarios de orden uno en cualquier parte del canal, se clasifica como de segundo orden, y así sucesivamente, como se muestra en la Figura 4.

En la clasificación HS no existe ningún parámetro que defina el orden de una cuenca, por lo que el orden máximo del cauce principal definirá el orden de la cuenca. Rivertools (RSI,

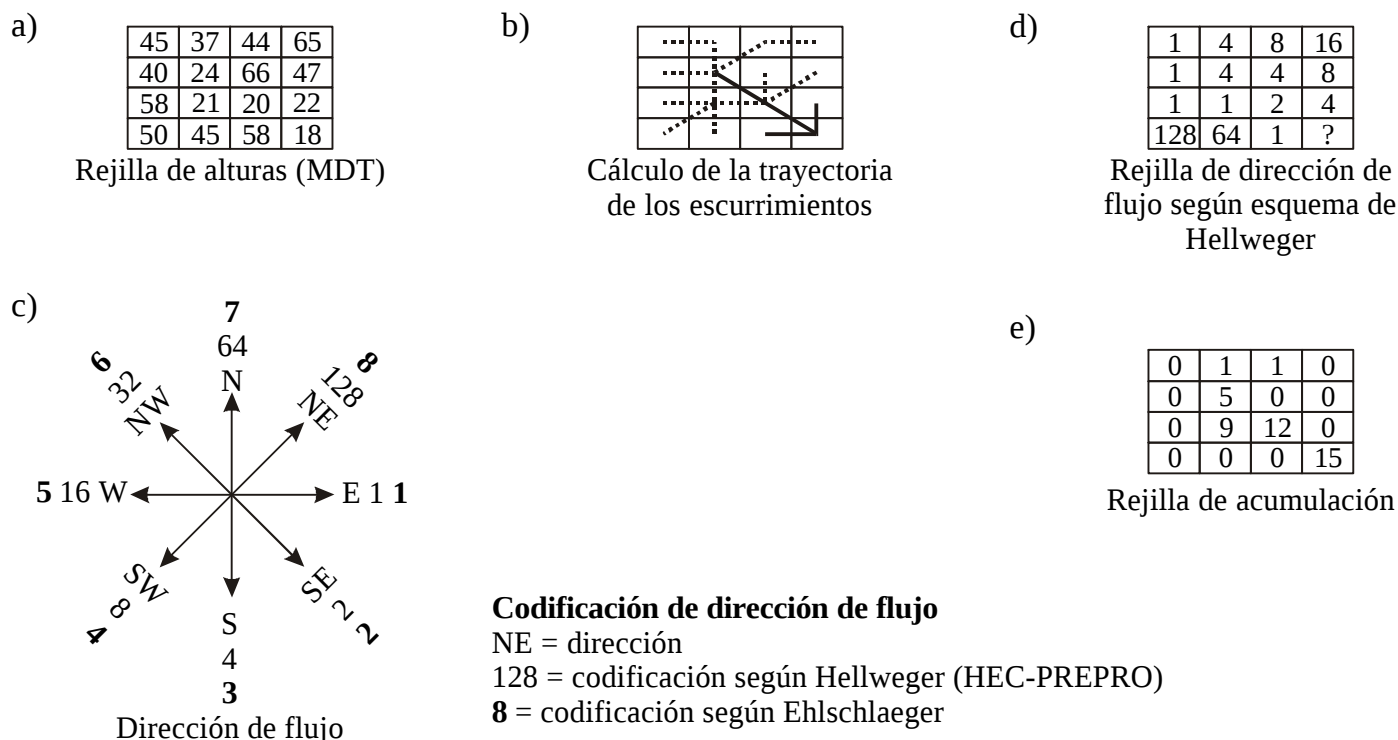


Figura 3. Descripción gráfica de los cálculos efectuados por los métodos propuestos por Hellweger (1997) y Ehlschlaeger (1989), resaltando la forma de codificación de la dirección del flujo.

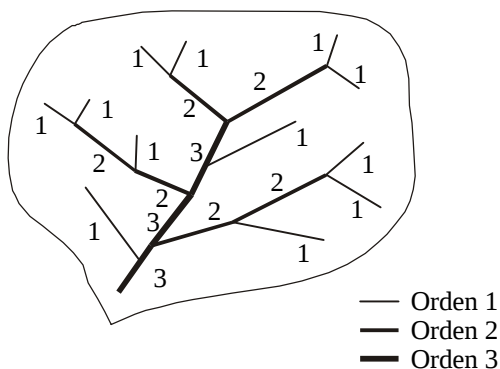


Figura 4. Clasificación de arroyos con el esquema de Horton (1932, 1945) y Strahler (1957).

1999) además de aplicar el modelo HS, calcula una serie de parámetros hidrológicos que nos permiten caracterizar las cuencas. Entre estos parámetros está la densidad del drenaje, la longitud, orden del afluente (clase jerárquica), el rango de alturas y el número total de afluentes, que permiten generar representaciones gráficas.

RESULTADOS

La extracción de los cauces se efectuó por los métodos de Hellweger (1997) y Ehlschlaeger (1991), obteniendo las trayectorias de los afluentes y la delineación de las cuencas. Los resultados de ambos métodos son similares en la delineación

de los cauces de los arroyos y en la definición de los parteaguas en las cuencas, pero difieren en el número de cuencas obtenidas.

Los resultados relevantes del método Hellweger fueron el cálculo del área y perímetro de las cuencas, trazo de arroyos y la delineación de los parteaguas. De este método, se obtuvieron 9 cuencas que, tomando como referencia los polígonos establecidos por INEGI (1995), difieren en forma y tamaño. Las poligonales de los parteaguas se muestran en la Figura 5 y el reporte de áreas aparece en la Tabla 1, que incluye la extensión territorial, el perímetro y la parte porcentual con respecto al total del área de estudio.

Las cuencas extraídas fueron confrontadas con las propuestas en la carta hidrológica 1:1,000,000 (INEGI, 1984) y con el estudio hidrológico del estado de Baja California (INEGI, 1995). Por efecto de la generalización de los rasgos de la escala 1,000,000, se observan diferencias en las áreas según se muestra en la Figura 5.

En el método Hellweger, la trayectoria del flujo se representa por vectores que delimitan los afluentes de las cuencas. La dirección del flujo, así como la acumulación de los escurrimientos, son almacenados en rejillas o matrices. Para la dirección de flujo, cada celda de la matriz almacena el código de dirección que seguiría el escurrimiento de acuerdo al esquema de la Figura 3c. En el caso de la rejilla de acumulación, cada celda almacena el número de celdas aguas arriba que contribuyen en el escurrimiento.

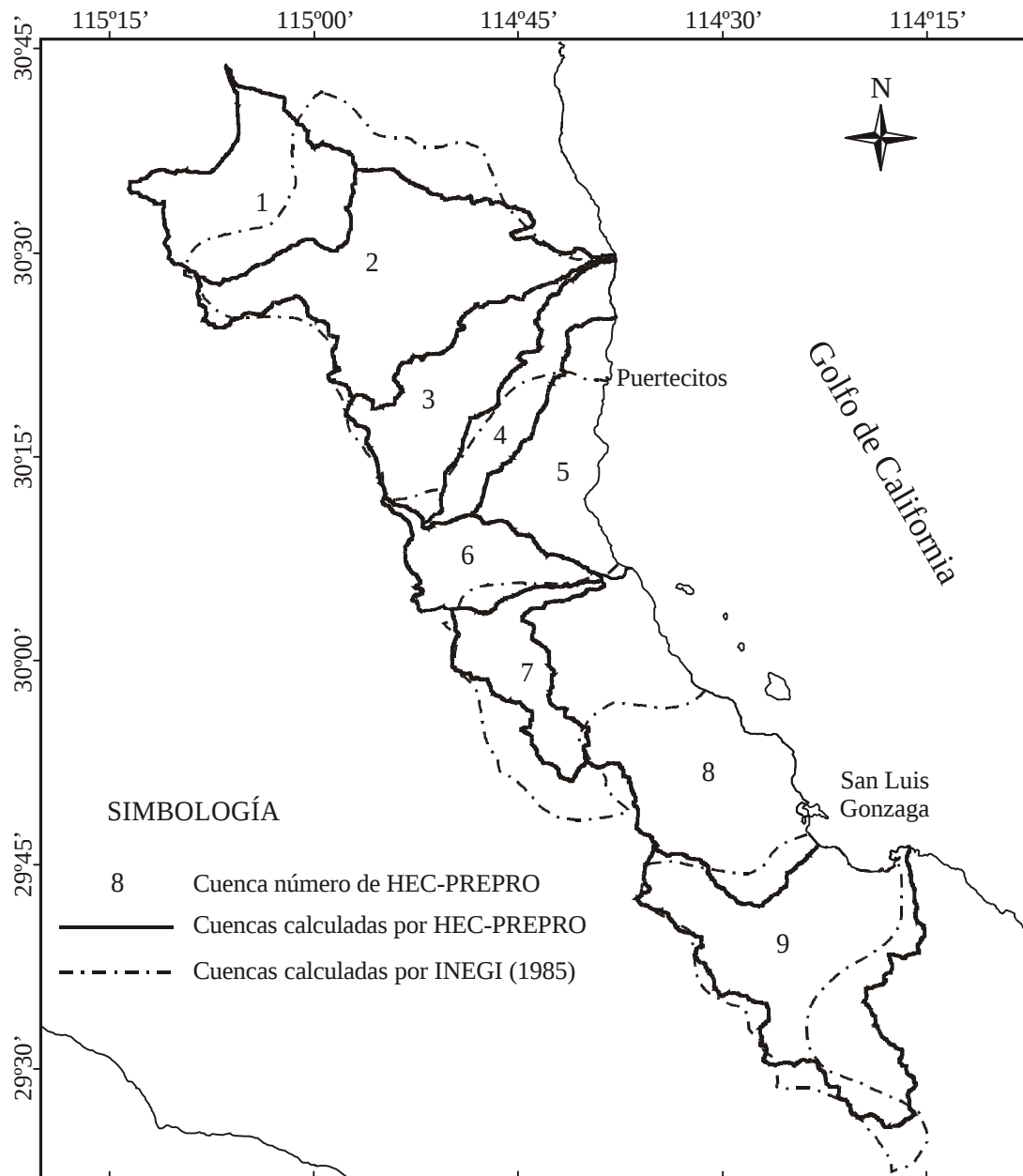


Figura 5. Límites de las cuencas propuestas por INEGI (1985) en la carta hidrológica escala 1:1'000,000 indicados en línea discontinua y límites obtenidos del procesado del MDT con el método Hellweger (1997) con línea gruesa.

El método de Ehlschlaeger (1989), está implementado en el módulo *r.watershed* de GRASS, del que se obtuvieron 22 cuencas. Los resultados son similares en cuanto al flujo y red de drenaje, y no se observan diferencias en el trazo de la red hidrológica.

Aunque el número de cuencas difiere en ambos métodos, los límites de algunas cuencas coinciden en ciertas secciones de los parteaguas, como se muestra en la figura 6, indicando con línea gruesa los parteaguas comunes. Algunas de las 9 cuencas calculadas por HEC-PREPRO, agrupan a varias cuencas del método de Ehlschlaeger. Por ejemplo, la cuenca 8 calculada por HEC-PREPRO e indicada en negritas en la figura 6,

agrupa a las cuencas 13,14,15,16 y 18 obtenidas por Ehlschlaeger. La relación entre las cuencas obtenidas por los dos métodos, se muestra en la Tabla 1, que incluye el área, perímetro y porcentaje del área de estudio que cubre cada cuenca.

Para la delimitación final de las cuencas en la caracterización hidrológica, se tomaron las 22 delineadas por el método Ehlschlaeger, del que se obtiene una segmentación más detallada. La distribución de las cuencas con los cauces de los arroyos se muestra en la Figura 7. Las cuencas se nombraron según la población o rasgo fisiográfico mas representativo, de acuerdo con la toponimia del INEGI (1995).

Tabla 1. Relación entre las 9 cuencas obtenidas con el método Hellweger (izquierda) agrupa algunas de las 22 cuencas obtenidas por Ehlschlaeger (derecha).

Método Hellweger				Método de Ehlschlaeger			
Nombre	Área (Km ²)	Perímetro (m)	%	Nombre	Área (Km ²)	Perímetro (m)	%
1 Parral	380	112,263	10.7	1 Parral	215	100,203	6.1
2 Matomí	626	184,944	17.5	2 San Fermín	170	111,963	4.8
3 El Canelo	314	134,495	8.8	3 Matomí	232	115,323	6.6
4 San Rafael	199	113,016	5.6	4 Las Blancas	233	99,843	6.6
5 Los Hemes	289	110,382	8.1	5 El Canelo	303	144,365	8.6
6 El Placer	191	88,005	5.4	6 Los Hemes	207	137,045	5.9
7 Zamora	190	109,616	5.3	7 Punta San Fermín	63	65,283	1.8
8 Las Palmitas	724	158,043	20.3	8 Puertecitos	29	42,362	0.8
9 Santa María	654	186,667	18.3	9 Sierra Santa Isabel	100	66,002	2.8
				11 El Huerfanito	108	76,323	3.1
				10 El Placer	193	103,803	5.5
				12 Zamora	180	123,964	5.1
				13 El Volcán	77	61,442	2.2
				14 La Olvidada	108	68,402	3.0
				15 San Judas	329	132,845	9.3
				16 Santa María	132	81,123	3.7
				18 San Luis Gonzaga	97	71,921	2.8
				17 Mesa Prieta	151	99,603	4.3
				19 Valle Calamajué	143	77,922	4.1
				20 Las Arrastras	321	129,751	9.1
				21 Punta Final	59	60,242	1.7
				22 La Josefina	79	51,602	2.2

En cada una de las 22 cuencas definidas, se hizo un análisis independiente con la herramienta Rivertools, obteniendo diversos índices hidrológicos, el orden de Horton-Strahler y estadísticas en la jerarquización de los afluentes. En la Figura 8 se muestran los histogramas de frecuencia de arroyos para cada orden Horton-Strahler (OHS), desde el primer orden que es el más abundante, hasta el sexto, donde sólo existe uno (cuenca 3, Matomí). El patrón de drenaje de una cuenca, está relacionado con la distribución de frecuencias por OHS que, a su vez, depende de la litología y edad de la cuenca.

De los histogramas de la Figura 8, podemos decir que algunas cuencas tienen semejanza en el patrón hidrológico, esto es, que mantienen una densidad de afluentes distribuidos a través del área de captación de la cuenca. El patrón hidrológico asociado a cuencas con una alta densidad de afluentes de bajo orden, es dendrítico, está asociado a una litología uniforme, como la de depósitos sedimentarios o de rocas volcánicas con baja o nula pendiente.

Observando la frecuencia de los cuatro primeros OHS en las 22 cuencas (Figura 8) y haciendo una comparación entre ellas, podemos clasificarlas en tres grupos, aquellas con frecuencias altas (A), medias (B) y bajas (C). A partir del quinto orden, las frecuencias disminuyen drásticamente. En el grupo A están las cuencas con las frecuencias más altas y está compuesto por las cuencas:

A. Parral (1), Matomí (3), El Canelo (5), Las Arrastras (21).

De acuerdo con la fisiografía, el grupo A se conforma principalmente de geoformas con sierras bajas, planicies y valles, que permiten el desarrollo de redes dendríticas y subdendríticas. El grupo B contiene a las cuencas con frecuencias medias e incluye a:

B. San Fermín (2), Los Hemes (6), Sierra Santa Isabel (9), El Placer (10), El Huerfanito (11), Zamora (12), La Olvidada (14), San Judas (15), Santa María (16), Mesa Prieta (17), Valle Calamajué (19), La Josefina (22).

El grupo B cuenta con el mayor número de cuencas con patrones subdendríticos y dendríticos, caracterizadas por la presencia de geoformas de gran rugosidad (serranías de rocas ígneas) y por la presencia de mesas volcánicas basculadas hacia el este, afectadas por fallas normales con orientación NNW a NNE (Martín-Barajas y Stock, 1993).

Las cuencas del grupo C son las que tienen las frecuencias más bajas y se componen de geoformas como planicies, valles, sierras medias y bajas que en su conjunto favorecen la formación de una red hidrológica dendrítica. Las cuencas del grupo C son:

C. Las Blancas (4), Punta San Fermín (7), Puertecitos (8), El Volcán (13), San Luis Gonzaga (18), Punta Final (20).

En la Tabla 2, se presentan índices hidrológicos adicionales calculados por Rivertools para las 22 cuencas y que permiten caracterizarlas con mayor detalle. Los índices que se incluyen son los siguientes:

(O) Orden de Strahler: Orden máximo según la clasificación de Horton-Strahler del cauce principal en la cuenca.

(A) Área de captación del arroyo principal en la cuenca: Es el área del arroyo principal.

(R) Relieve de la cuenca: Diferencia de altura entre los valores máximo y mínimo en la cuenca.

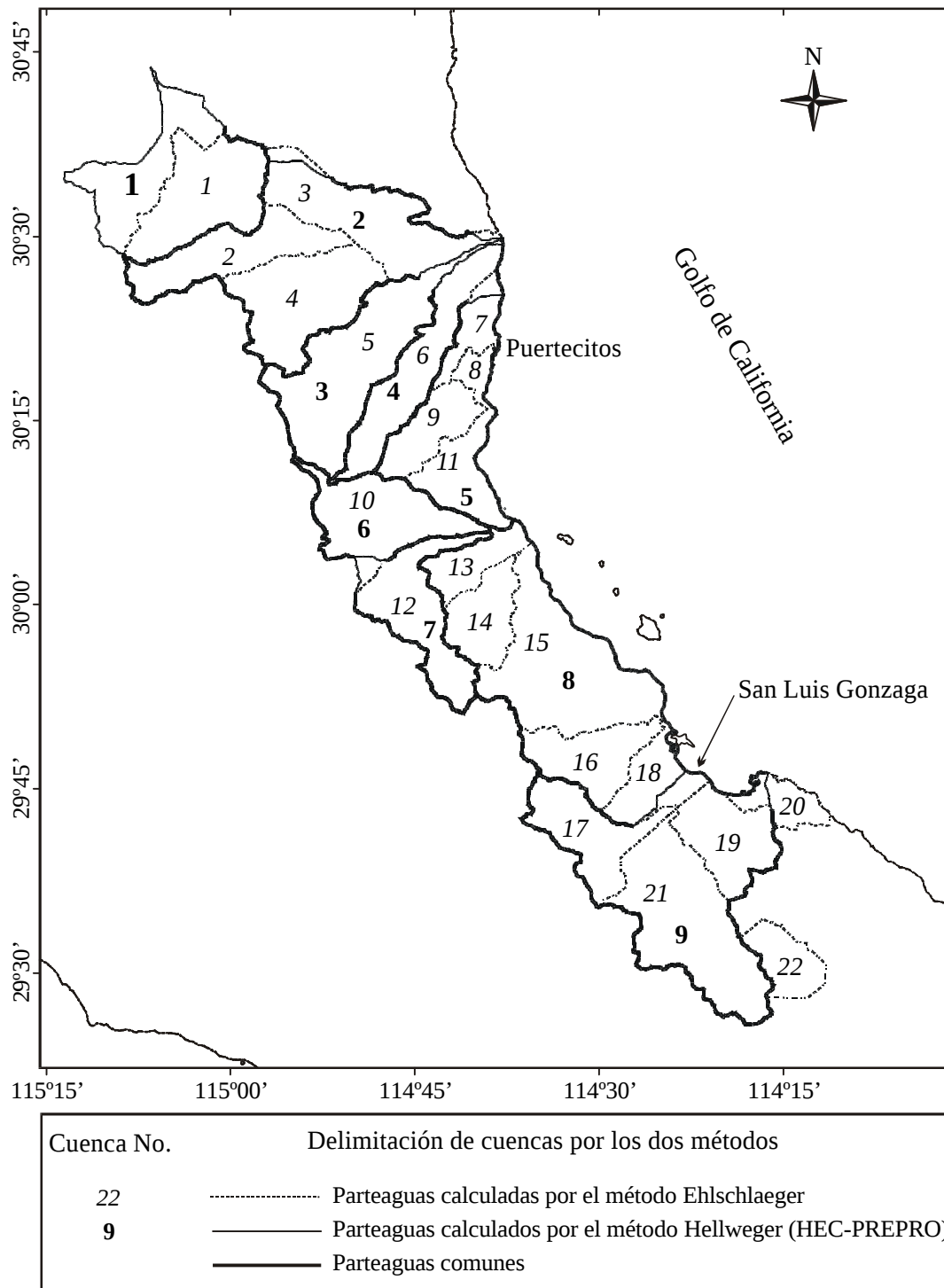


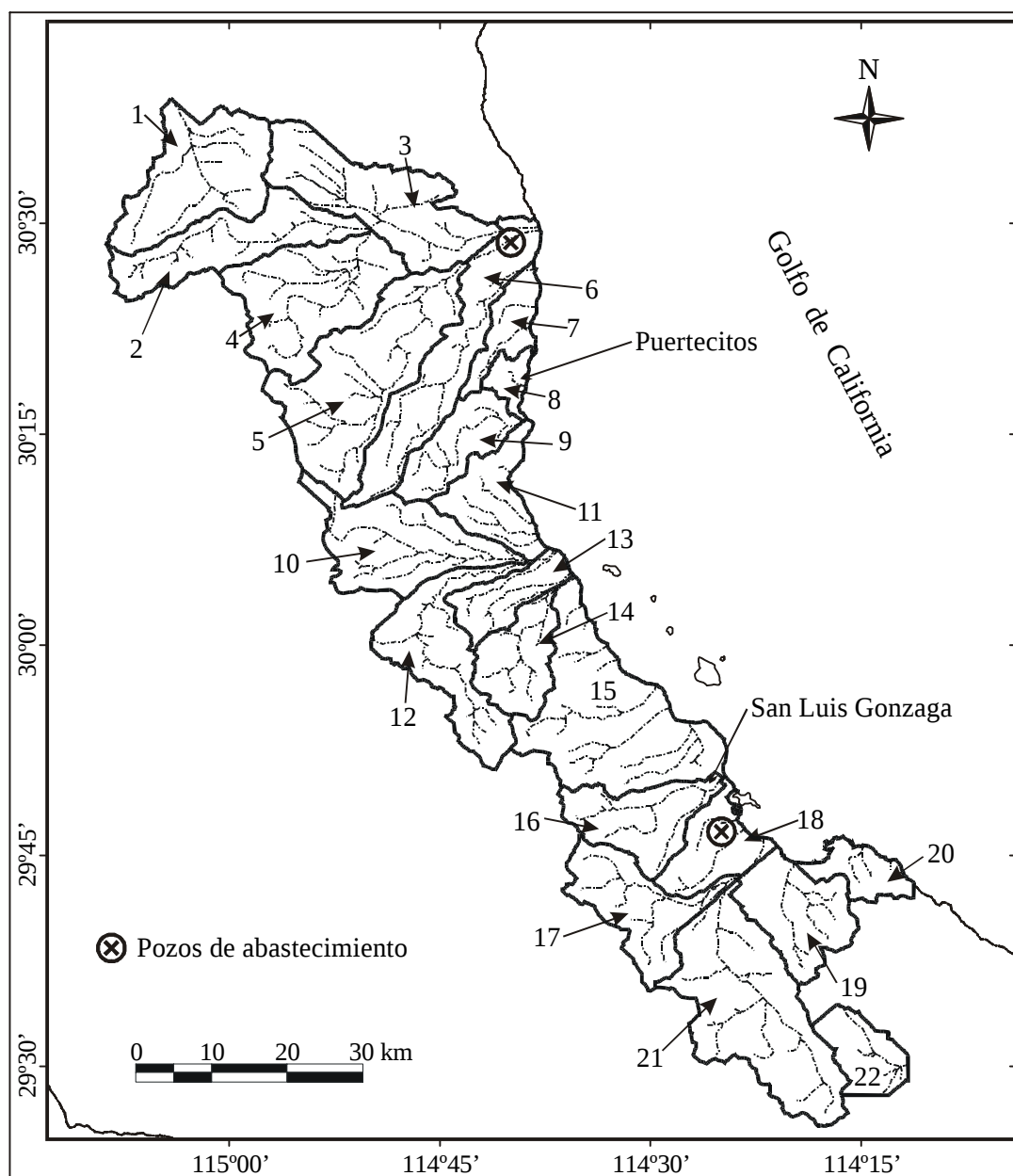
Figura 6. Coincidencias y diferencias en la delimitación de cuencas por los métodos de Hellweger y Ehlschlaeger. Los parteaguas coinciden en la mayoría de los casos, pero existen ligeras diferencias indicadas con diferentes simbologías.

(LT) Longitud total de los canales: Distancia total de la red hidrológica de la cuenca.

(DD) Densidad de drenaje: Cociente de la longitud de los tributarios y el área de drenaje (LT/A).

(DF) Densidad fuente: Cociente del número de tributarios en una red de drenaje (magnitud) y el área de la cuenca.

Del índice O en la Tabla 2, vemos que solamente la cuenca Matomí (3) alcanza un sexto orden con un valor alto en la densidad de drenaje (DD) de 2.9 km^{-1} y una longitud total de arroyos (L) de 611 km. La cuenca con el valor más alto de L, es Las Arrastras(21) con 741.5 km. La cuenca Josefina(22) alcanza el valor máximo de 3.1 km^{-1} en densidad de drenaje.



Cuencas Finales

1) Parral	6) Los Hemes	11) El Huerfanito	16) Sta. María	21) Las Arrastras
2) San Fermín	7) P. San Fermín	12) Zamora	17) Mesa Prieta	22) La Josefina
3) Matomí	8) Puertecitos	13) El Volcán	18) S.L. Gonzaga	
4) Las Blancas	9) S. Santa Isabel	14) La Olvidada	19) V. Calamajué	
5) El Canelo	10) El Placer	15) San Judas	20) Punta Final	

Figura 7. Delineación de las cuencas finales obtenidas por el método Ehlschlaeger indicadas con línea gruesa y la hidrología superficial por el método Hellweger en línea discontinua. Se indican la ubicación de los pozos que abastecen a las localidades de Puertecitos y San Luis Gonzaga.

Cabe destacar que para la zona de estudio, los arroyos de mayor importancia son el arroyo Matomí y el arroyo Santa María, que recargan los acuíferos de los que se abastecen las localidades más pobladas, Puertecitos y San Luis Gonzaga respectivamente. Las cuencas que aportan descargas al abanico

aluvial del arroyo Matomí son: Matomí (3), San Fermín (2), Las Blancas (4), El Canelo (5) y Los Hemes (6) que en su conjunto vierten escurrimientos durante eventos pluviales, como los fenómenos esporádicos que han dañado a la región, como el que suscitó el Huracán Nora en 1997.

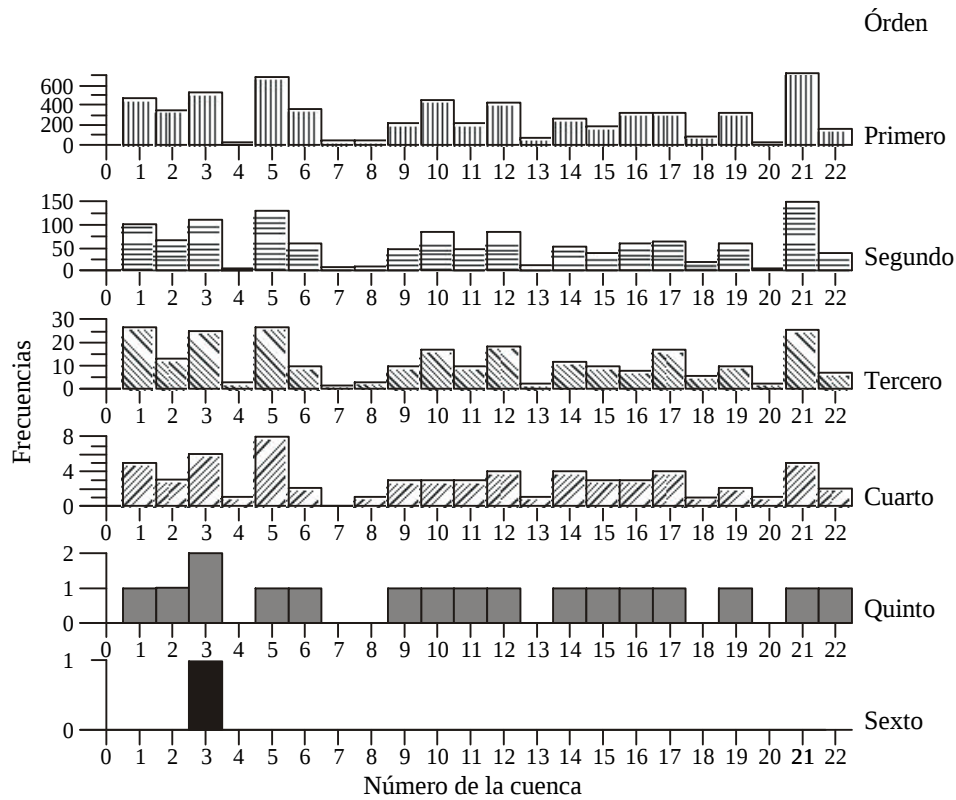


Figura 8. Histogramas de los órdenes Horton-Strahler para las 22 cuencas de la zona de estudio. El número de cuenca indicado en la parte inferior de cada histograma sigue el esquema de la figura 7.

Tabla 2. Índices hidrológicos calculados con Rivertools para cada cuenca.

No.	Nombre	O	A (km ²)	R (km)	LT (km)	DD (km ⁻¹)	DF (km ⁻²)
1	Parral	5	196.7	1.5	542.8	2.8	2.4
2	San Fermín	5	146.5	1.5	294.2	2.0	2.4
3	Matomí	6	209.6	1.0	611.0	2.9	2.5
4	Las Blancas	4	225.0	0.9	108.4	0.5	0.1
5	El Canelo	5	292.4	1.0	576.6	2.0	2.3
6	Los Hemes	5	157.4	0.9	326.0	2.1	2.3
7	Punta San Fermín	3	19.9	0.6	38.7	1.9	1.8
8	Puertecitos	4	12.9	0.4	24.6	1.9	2.4
9	Sierra Santa Isabel	5	94.9	0.7	176.9	1.9	2.3
10	El Placer	5	169.3	1.1	383.1	2.3	2.5
11	El Huerfanito	5	181.5	0.9	368.1	2.0	2.5
12	Zamora	5	24.4	0.5	41.1	1.7	2.1
13	El Volcán	4	33.5	0.5	65.9	2.0	2.0
14	La Olvidada	5	100.0	0.9	191.8	1.9	2.6
15	San Judas	5	69.5	1.0	150.0	2.2	2.7
16	Santa María	5	125.5	1.0	243.6	1.9	2.6
17	Mesa Prieta	5	122.7	1.3	255.8	2.1	2.7
18	San Luis Gonzaga	4	27.4	0.5	79.2	2.9	2.7
19	Valle Calamajué	5	114.3	0.8	322.0	2.8	2.7
20	Punta Final	4	9.0	0.7	19.5	2.2	3.0
21	Las Arrastras	5	290.3	1.3	741.5	2.6	2.5
22	La Josefina	5	60.5	0.6	188.6	3.1	2.6

Para los pozos ubicados en la llanura costera de San Luis Gonzaga, en las proximidades del arroyo Santa María, las cuencas que aportan escurrimientos a los acuíferos son: Santa María (16), Mesa Prieta (17), San Luis Gonzaga (18) y Las Arrastras (21).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al aplicar los métodos de Hellweger y Ehlschlaeger se obtuvieron redes hidrológicas similares a la que INEGI propone en su cartografía escala 1:50,000. Sin embargo, los parteaguas entre cuencas difieren. En la delineación de las cuencas, el método Ehlschlaeger las delimitó con mayor detalle, definiendo parteaguas de 22 cuencas, en comparación con las 9 obtenidas por el método Hellweger. Este último no fragmentó 5 de las 9 cuencas que el método de Ehlschlaeger subdividió en subcuencas como se aprecia en la Figura 6, existiendo concordancia en las cuencas 3, 4, 6 y 7.

Cada método tiene sus ventajas: el método Hellweger realizó un buen trazo del patrón de drenaje, mientras que el de Ehlschlaeger realizó un mejor delineamiento de los parteaguas de las cuencas. Para la caracterización hidrológica, se tomaron las 22 cuencas de Ehlschlaeger y el patrón de drenaje de Hellweger.

A diferencia de los dos métodos anteriores, Rivertools realizó un análisis más minucioso sobre el MDT, extrayendo una red hidrológica más densa, calculando otros índices hidrológicos como la densidad de drenaje, el orden Horton-Strahler, perfiles del relieve a lo largo del cauce de algún arroyo y otros más.

De acuerdo a la distribución de frecuencias en los primeros 4 OHS, se agruparon a las 22 cuencas obtenidas por Ehlschlaeger en tres grupos. En el primer grupo (A) con las frecuencias más altas, están las cuencas influenciadas por rasgos geomorfológicos importantes; por un lado las mesetas basculadas de la provincia volcánica de Puertecitos y el escarpe principal del Golfo de California, además de conformarse de sedimentos superficiales (aluviones), favoreciendo a la generación de afluentes al cauce principal de la cuenca.

El grupo B con las frecuencias medias de OHS, son cuencas que están bajo la influencia de relieves con mayor rugosidad, asociadas a complejos de serranías, condicionando la red dendrítica a una formación menos densa. Por último grupo C, son cuencas que cubren complejos de serranías con abanicos aluviales de menor rugosidad.

Las cuencas más importantes en la parte norte de la zona de estudio son: Matomí (3), San Fermín (2), Las Blancas (4), El Canelo (5) y Los Hemes (6) (Figura 7) que en conjunto suman una área de captación de 1,145 km² que recarga los acuíferos de las llanuras aluviales del arroyo Matomí, donde se ubica el pozo de abastecimiento de Puertecitos.

Al sur, las cuencas importantes son Mesa Prieta (17), San Luis Gonzaga (18), Valle Calamajué (19) y las Arrastras (21) cubriendo una extensión de 523 km², que representa el 15% del área en la zona de estudio, descargando sus escurrimientos al arroyo Santa María y a la planicie costera donde se localiza el pozo que abastece a los pobladores de San Luis Gonzaga.

El patrón de una red hidrológica tiene una relación directa con la litología que atraviesa el cauce. La densidad de drenaje, es un índice que está relacionado con el tipo de relieve, la litología y la edad de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolló en las instalaciones del CICESE, bajo el proyecto "Caracterización de recursos naturales de la zona costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga, Baja California, apoyada en imágenes multiespectrales de alta resolución". Este proyecto fue financiado por Sistema de Investigación Regional del Mar de Cortés (SIMAC 970107002). Así mismo a la valiosa colaboración de Francisco Núñez Cornú por sus atinados comentarios a la realización de este documento. Finalmente, agradecemos la revisión y sugerencias de un árbitro anónimo y la edición final de las figuras por parte de Víctor Manuel Frías Camacho.

REFERENCIAS

- Berry, J.K., 1997. Spatial reasoning for Effective GIS, GIS world books, Colorado, USA, 208 pp.
- Birkin, M., Clarke, G., Clarke, M., and Wilson, A., 1996. Intelligent GIS localization decision and strategic planning, Geoinformation International, United Kingdom, 292 pp.
- Black, P.E., 1996. Watershed hydrology. Michigan, Ann Arbor Press, 449 pp.
- Bonham-Carter, G.F., 1997. Geographic information systems for geoscientists, Computer methods in the geosciences, Ottawa, Ontario, Canadá. 398 pp.
- Cialella, A.T., R. Dubayah, *et al.*, 1997. Predicting soil drainage class using remotely sensed and digital elevation data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 63(4): p. 171-178.
- Ehlschlaeger, C., 1991. The GRASS/Mathematical link: Developing hydrologic models in geographic information systems interfaced with computer algebra systems, U.S. Army construction engineering research Lab.
- Ehlschlaeger, C., 1989. Using the AT search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation data, Processing of international geographic information system (IGIS) symposium '89. Baltimore, MD, p. 275-281.
- ER-Mapper, 1995. Level one training workbook for land information applications, in earth resource mapping Pty. Ltd., ed., Training workbook, 322 pp.
- Felícísimo, A.M., 2000. Modelos digitales del terreno introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales, <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>.
- Fletcher, F.W., 1997. Basic hydrogeologic methods a field and laboratory manual whit microcomputers applications, Pennsylvania, Technomic publishing Co. Inc., 310 pp.
- Franklin, S.E., 1987. Terrain analysis from Dighita; Patterns in Geomorphometry and Landsat MSS Spectral Response, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 53 (1): p. 59-65.
- GRASS, 1999. Geographic Resource and Analysis Support System <http://www.baylor.edu/~grass/>
- Hellweger, F., 1997, HEC-PREPRO: Austin, TX. <http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>
- Horton, R.E., 1932. Drainage basin characteristics, American Geophysical Union Transactions, p. 350-361.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geol. Soc. America Bull., 56, 275-370.
- INEGI, 1995. Estudio hidrológico del estado de Baja California, México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 180 pp.
- INEGI, 1982. Carta estatal, Regionalización fisiográfica, México, D.F., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

- INEGI, 1984. Síntesis geográfica de Baja California, México. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 113 pp.
- Jenson, S.K. and J.O. Domínguez, 1988. Extracting topographic structures from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54(11): p. 1593-1600.
- Leberect, F., 1997-1998. HEC-PREPRO: A GIS preprocessor for lumped parameter hydrologic modeling programs, Austin, Tx, Center for Research in Water Resources. http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/rpt97_8/rpt97_8.html
- Llamas, J., 1989. Hidrología general, principios y aplicaciones, Universidad Autónoma del Estado de México, 626 pp.
- Longley, P. and M. Batty, 1996, Spatial analysis modelling in a GIS environment. New York Geoinformation International, 392 pp.
- López-Blanco, J., 1994. The role of gis-user interactive process in the delineating boundaries of environmental units for land managing: an application in Baja California, México, *GIS/LIS*: p. 545-554.
- Martín-Barajas, A. y J. M. Stock, 1993. Estratigrafía volcánica y características petrológicas de la secuencia volcánica de Puertecitos, NE de Baja California. Transición del vulcanismo de arco a vulcanismo de rift en el golfo. En: *Contribuciones a la tectónica del occidente de México*, Delgado-Argote y Martín-Barajas (eds.), *Monografías de la Unión Geofísica Mexicana*, No. 1, p. 66-89.
- RSI, 1999. RiverTools Version 2.0 User's Guide. Reserach, Systems, Inc.
- Sanjuame, M.S. y Villanueva, R.J.B., 1996. Teoría y métodos en geografía física, Editorial Síntesis, Madrid, 303 pp.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Am. Geophys. Union Trans.*, 38(6), p. 913-920.
- Strahler, A.N., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, In; *Handbook of Applied Hydrology*, edited by Chow, V.T., New York, McGraw-Hill, p. 39-76.